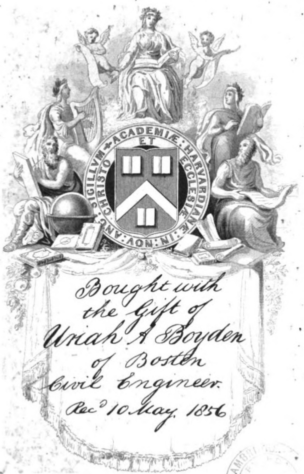
Digitized by Google

~~29.5.12~~

Phys 208.56



CAMBRIDGE

Digitized by Google

Digitized by Google

ÉLÉMENTS
DE PHYSIQUE
EXPÉRIMENTALE
ET DE MÉTÉOROLOGIE

Digitized by Google

TYPOGRAPHIE DE CH. LAHURE
Imprimeur du Sénat et de la Cour de Cassation
rue de Vaugirard, 9

Digitized by Google

ÉLÉMENTS
DE PHYSIQUE
EXPÉRIMENTALE
ET DE MÉTÉOROLOGIE

PAR

M. POUILLET
MEMBRE DE L'INSTITUT (ACADÉMIE DES SCIENCES

OUVRAGE AUTORISÉ PAR LE CONSEIL DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE

Septième édition

TEXTE
TOME SECOND

PARIS
LIBRAIRIE DE L. HACHETTE ET C^{ie}
RUE PIERRE-SARRAZIN, N° 14
(Près de l'École de médecine)

1856

Digitized by Google

Phys 208.56

Digitized by Google

ÉLÉMENTS
DE PHYSIQUE
EXPÉRIMENTALE
ET DE MÉTÉOROLOGIE.

LIVRE QUATRIÈME.

DES ACTIONS MOLÉCULAIRES.

---

1. Un corps organique ou inorganique peut être considéré comme un système en équilibre; ses parties constituantes ou ses molécules les plus rapprochées restent séparées par des intervalles plus ou moins grands, et cependant à ces distances elles agissent sans cesse les unes sur les autres, pour se maintenir dans leurs positions respectives, pour s'attirer ou se repousser, ou enfin pour se communiquer les efforts et les pressions qu'elles supportent. Ce sont ces actions mutuelles des molécules que l'on appelle, en physique, *actions moléculaires*. Il serait difficile d'établir une distinction entre ces forces et les *forces chimiques*, qui agissent pareillement, aux mêmes distances, sur toutes les molécules de la matière; mais l'on peut dire que les actions chimiques tendent à produire les corps et à les constituer dans un état déterminé d'équilibre ou d'agrégation, tandis que les actions moléculaires proprement dites tendent à conserver les corps, ou à les retenir dans l'état d'équilibre ou d'agrégation qu'ils ont reçu. Considérées sous ce point de vue, les actions moléculaires comprennent encore un champ assez vaste pour qu'il soit nécessaire d'y établir quelques divisions. Ainsi nous étudierons, dans des chapitres séparés, la *capillarité*, la *structure des corps* et l'*élasticité*.

Digitized by Google

CHAPITRE PREMIER.

Capillarité.

2. Lorsqu'on trempe dans un liquide l'extrémité d'un tube de verre, on voit que la colonne qui pénètre dans ce tube ne s'arrête presque jamais au niveau extérieur. Dans l'eau, par exemple, elle s'élève au-dessus (Pl. 28, Fig. 1), et dans le mercure, au contraire, elle s'abaisse au-dessous (Fig. 2). Ces phénomènes d'*ascension* ou de *dépression* sont appelés *phénomènes capillaires*, et la force qui les produit est l'*action capillaire*, l'*attraction capillaire*, ou simplement la *capillarité;* cette force n'agit pas seulement pour élever ou déprimer les petites colonnes liquides dans l'intérieur des tubes, elle s'exerce sans cesse au contact des liquides avec les solides, au contact des liquides entre eux ou des solides entre eux, et en général au contact de toutes les parcelles les plus ténues de la matière pondérable.

3. Les longueurs des colonnes soulevées ou déprimées sont en raison inverse des diamètres des tubes.

Il est facile de reconnaître par l'expérience qu'en général les différences de niveau sont d'autant plus grandes que les diamètres des tubes sont plus fins. C'est ce qui est représenté dans les quatre tubes à siphon de la figure 3. Les deux premiers contiennent de l'eau, et l'élévation est double dans le deuxième, dont le diamètre est moitié moindre; les deux derniers contiennent du mercure, et la dépression est pareillement double dans le quatrième, dont le diamètre est moitié de celui du troisième. Cependant, pour établir cette loi fondamentale sur des expériences précises, il faut avoir recours à d'autres moyens d'observation. Voici l'appareil très-exact dont Gay-Lussac a fait usage.

a (Fig. 6) est une large éprouvette fixée sur un pied à vis calantes, afin que son bord supérieur *b* puisse être rendu horizontal. Le liquide qu'elle contient s'élève jusqu'en *c*; le tube capillaire *d* est monté sur une plaque *e* qui se pose sur le bord de l'éprouvette; au moyen d'une coulisse verticale, le tube peut monter ou descendre. A côté de l'éprouvette, à quelques centi-

mètres de distance, est une règle verticale *f*, sur laquelle se meut une lunette *g*, d'abord à frottement, et ensuite au moyen d'une vis de rappel pour les petits mouvements. Pour mesurer la hauteur de la colonne, on fait d'abord mouvoir la lunette jusqu'à ce que son fil micrométrique horizontal semble raser le sommet *s*; ensuite, écartant la plaque *e* vers les bords de l'éprouvette, on place à côté d'elle la pièce *h*, et, après l'avoir ajustée, on tourne la tige à vis *k* jusqu'à l'instant où elle effleure la surface du liquide; ensuite on enlève un peu de liquide avec une pipette, on note le point de départ de la lunette, et on la fait descendre jusqu'à ce que la pointe de la tige tombe sous le fil; l'étendue de sa course est la hauteur du liquide au-dessus du niveau.

Le tableau suivant contient la moyenne des résultats auxquels Gay-Lussac a été conduit.

NOM des SUBSTANCES.	DENSITÉ.	TEMPÉRATURE en degrés centigrades.	ÉLÉVATION dans un tube dont le diam. = $1^{mm},2944$.	ÉLÉVATION dans un tube dont le diam. = $1^{mm},9038$.	ÉLÉVATION dans un tube dont le diam. = $10^{mm},508$.
			mm	mm	mm
Eau.........	1	8°,5	23,1634	15,5861	»
Alcool.......	0,8196	8	9,1823	6,4012	»
Id.	0,8595	10	9,301	»	»
Id.	0,9415	8	9,997	»	»
Id.	0,8135	16	7,078		0,3835
Essence de térébenthine..	0,8695	8	9,8516	»	

Les diverses densités sont prises aux températures indiquées dans la troisième colonne. Le diamètre des tubes se détermine en pesant le mercure qu'ils contiennent dans une longueur connue.

Le rapport inverse des diamètres des deux premiers tubes est 1,474, et le rapport des hauteurs correspondantes est 1,486 pour l'eau, et 1,434 pour l'alcool. Ainsi, l'on peut bien admettre comme loi expérimentale que les hauteurs des colonnes soulevées sont en raison inverse des diamètres des tubes.

Cette loi cependant cesserait d'être exacte, si l'on voulait l'appliquer à des tubes d'un grand diamètre; c'est ce qui est mis hors de doute par des expériences nombreuses et faites avec soin par Simon (*Ann. de Chim. et de Phys.*, 1851), mais, pour les petits

Digitized by Google

diamètres, les expériences de cet habile observateur me semblent confirmer celles de Gay-Lussac.

C'est pourquoi nous donnons ici, d'après les expériences de M. Frankenheim, les hauteurs auxquelles s'élèvent divers liquides, à la température zéro, dans un tube de 1 millimètre de diamètre; ce qui permettra de calculer ces hauteurs pour des tubes plus petits, n'ayant même que quelques centièmes de millimètre de diamètre.

NOMS des SUBSTANCES.	DENSITÉ.	ÉLÉVATION dans un tube dont le diam. = 1mm, à la temp. zéro.
Eau	1	30,73
Acide formique	1,105	20,40
Chlorure de zinc	1,364	20,12
Acide acétique	1,290	17,02
Acide sulfurique	1,840	16,80
Solution de potasse	1,274	15,40
Essence de citron	0,838	14,46
Essence de citron, 2e espèce	0,866	13,90
Pétrole	0,847	13,90
Essence de térébenthine	0,890	13,52
Ether acétique	0,905	12,20
Alcool	0,821	12,40
Id.	0,927	12,82
Id.	0,967	14,54
Éther	0,737	10,80
Sulfure de carbone	1,290	10,20
Soufre à 100°	1,980	4,64

Ces résultats, toujours indépendants de l'épaisseur des tubes, sont aussi indépendants de la matière qui les compose, pourvu toutefois que cette matière puisse être mouillée par le liquide.

On a longtemps admis, d'après quelques inductions théoriques, que pour un même liquide les différences de niveau sont en raison directe de la densité; mais les expériences précises de M. Brunner et de M. Frankenheim démontrent qu'il n'en est pas rigoureusement ainsi, et que, pour des températures croissantes, les hauteurs des colonnes liquides soulevées par la capillarité décroissent toujours un peu plus rapidement qu'elles ne feraient, si elles restaient proportionnelles à la densité.

M. Brunner a même soigneusement constaté que, entre 0 et 4°, l'élévation capillaire de l'eau va en diminuant, bien que la densité aille en augmentant.

Dans toutes ces expériences, une précaution indispensable est de nettoyer parfaitement les parois intérieures des tubes et d'enlever toutes les impuretés qui pourraient les souiller.

Nous devons remarquer de plus que toutes les fois qu'il y a *ascension*, dans un tube capillaire assez étroit, le sommet de la colonne liquide prend la forme d'un *ménisque concave*, c'est une demi-sphère de même diamètre que le tube (Fig. 4); au contraire, quand il y a dépression, le sommet de la colonne liquide prend la forme d'un ménisque convexe (Fig. 5). Ces formes sont essentiellement liées à l'ascension et à la dépression; car si l'on enduit de quelque corps gras la surface intérieure d'un tube de verre, et qu'on en plonge l'extrémité dans de l'eau colorée, on observe que non-seulement l'eau cesse de s'élever au-dessus du niveau, mais qu'elle reste *déprimée* dans ce tube enduit de graisse, et qu'en même temps le sommet de la colonne prend la forme du *ménisque convexe*, comme fait le mercure dans les tubes ordinaires. Il résulte de cette observation que *les différences de niveau dépendent de la forme du ménisque*, et qu'ainsi toutes les causes accidentelles qui pourraient empêcher celui-ci de prendre la forme exacte qu'il doit avoir, empêcheraient aussi, par cela même, le liquide de parvenir à la hauteur précise à laquelle il doit trouver la stabilité de son équilibre. En effet, lorsqu'on plonge dans l'eau un tube dont la surface intérieure semble même très-nette, on observe presque toujours des *dentelures* plus ou moins marquées sur les bords du ménisque, et si l'on répète alors l'expérience plusieurs fois, on trouve des nombres fort différents.

4. Quand les tubes ne sont plus très-étroits, le ménisque cesse d'être hémisphérique, le sommet s'aplatit à mesure que le diamètre augmente, et bientôt quand les tubes sont assez larges, le ménisque prend la forme d'un plan dont les bords seuls s'infléchissent en courbe concave ou convexe, comme s'ils étaient attirés ou repoussés par les parois. C'est ce qui arrive, en général, sur l'eau ou sur le mercure, dans les appareils gradués qui servent à mesurer les volumes des gaz. Les divisions de ces appareils, faites au diamant, indiquent des capacités égales, par exemple, des centimètres cubes ou des dixièmes de centimètre cube; mais, elles ne doivent correspondre ni au *sommet du ménisque* ni au *cercle de contact* du liquide avec la paroi, il faut, pour l'exactitude, qu'elles marquent le *plan d'affleurement*, c'est-à-

dire celui qui terminerait la colonne liquide si elle était pressée par un piston plan et parfait.

M. Danger, très-habile constructeur de ces sortes d'appareils, procède en effet de la sorte ; pour y parvenir, il a dressé le tableau suivant :

DIAMÈTRE intérieur des tubes en millimètres.	FLÈCHE de la portion du ménisque au-dessus du plan d'affleurement.	FLÈCHE de la portion du ménisque au-dessous du plan d'affleurement.	HAUTEUR du ménisque complet.
mm	mm	mm	mm
1	0,178	0,143	0,321
2	0,310	0,261	0,571
3	0,410	0,369	0,779
4	0,486	0,467	0,953
5	0,544	0,558	1,102
6	0,584	0,643	1,218
7	0,610	0,710	1,320
8	0,630	0,782	1,412
9	0,639	0,844	1,483
10	0,643	0,900	1,543
11	0,643	0,946	1,589
12	0,637	0,988	1,625
13	0,627	1,024	1,651
14	0,610	1,056	1,666
15	0,591	1,086	1,677
16	0,570	1,110	1,680
17	0,550	1,134	1,684
18	0,530	1,157	1,687
19	0,511	1,177	1,688
20	0,495	1,190	1,685
....	....	....	....
30	0,355	1,325	1,670
....	....	....	....
60	0,178	1,540	1,718

Voici maintenant la méthode ingénieuse qu'il a employée pour prendre ces mesures : un tube cylindrique, d'un diamètre connu est coupé, dressé et poli bien perpendiculairement à l'axe ; on le fixe verticalement, on le remplit de mercure, et avec un obturateur plan on vient enlever tout l'excédant de liquide ; alors, en faisant glisser doucement l'obturateur horizontal, le mercure reprend sa liberté, quitte les parois du tube et s'arrange en ménisque ; les bords du tube qui ont été rasés par l'obturateur forment donc le plan d'affleurement, et il reste à mesurer l'élévation du sommet du ménisque au-dessus de ce plan et l'abaissement du cercle de contact au-dessous ; la somme de ces distances est la hauteur totale du ménisque.

M. Danger a fait ces opérations avec autant d'habileté que de

Digitized by Google

persévérance; nous avons seulement rapporté les résultats qu'il a obtenus pour les tubes des dimensions les plus usuelles.

Cette table sert en même temps à exécuter des graduations précises et à faire la correction indispensable qu'exige la lecture des divisions. En effet, un gaz étant contenu dans un tube gradué d'après ce système, on peut lire la division correspondante au sommet du ménisque, ou au cercle de contact; dans le premier cas, il faut ajouter à la longueur de la colonne de gaz le nombre de la deuxième colonne qui correspond au diamètre du tube; dans le deuxième cas, il faut en retrancher celui de la troisième colonne, et ensuite, d'après cette division elle-même, transformer cette colonne en unités de volume.

M. Ed. Desains, dans un travail intéressant sur les phénomènes capillaires (*Comptes rendus de l'Académie*, mai 1852), a fait voir avec quelle précision les expériences de M. Danger confirment la théorie de Laplace, et il a lui-même étendu cette confirmation aux ménisques que l'eau forme dans les tubes larges de verre ou de cristal. Ces expériences permettront de mesurer avec beaucoup plus de précision qu'on n'a pu le faire jusqu'à présent, les volumes des gaz contenus sur l'eau dans des tubes gradués. Ici, le cercle de contact du liquide n'étant pas visible, on est obligé de prendre pour repère le sommet du ménisque, alors il faut retrancher la hauteur du plan d'affleurement au-dessus de ce repère, ou transformer en unité de volume cette hauteur qui est exprimée en millimètres, dans le tableau suivant, où M. Desains a consigné le résultat de ses expériences.

DIAMÈTRE des tubes en millimètres.	HAUTEUR du plan d'affleurement au-dessus du sommet en millimètres.	DIAMÈTRE des tubes en millimètres.	HAUTEUR du plan d'affleurement au-dessus du sommet en millimètres.
2	0,317	20	1,193
4	0,607	22	1,142
6	0,839	24	1,091
8	0,998	26	1,041
10	1,140	28	0,992
12	1,252	30	0,945
14	1,365	40	0,744
16	1,299	50	0,603
18	1,244	60	0,504

Le même mode de graduation, de lecture et de correction

doit être adopté pour le jaugeage des liquides; cependant, si une éprouvette ne devait jamais être employée qu'à mesurer le liquide qui a servi à sa graduation, ou pourrait se borner à tracer les divisions vis-à-vis le sommet du ménisque.

5. Hauteurs différentes auxquelles peut s'arrêter le même liquide dans le même tube. — Lorsqu'un tube a servi à une expérience, si on le retire du liquide avec précaution, et qu'on observe la hauteur de la colonne qui reste suspendue dans son intérieur, on reconnaît qu'elle est toujours plus grande qu'elle n'était d'abord : par exemple, *ab* (Fig. 12) étant la colonne soulevée au-dessus du niveau pendant que le tube est plongé, la colonne suspendue lorsqu'il sera hors du liquide pourra être *cd* ou même *ef*. Cette différence dépend de la goutte qui reste à l'extrémité inférieure du tube et qui forme un ménisque plus ou moins convexe. En effet, pour des parois très-épaisses, sur lesquelles la goutte s'élargit beaucoup, cet excès d'élévation est toujours moindre; au contraire, dans les tubes à parois très-minces, le ménisque convexe de la goutte étant à peu près égal au ménisque concave du sommet de la colonne, on observe un excès d'élévation presque égal à l'élévation elle-même, c'est-à-dire que *ef* est double de *ab*.

Les tubes recourbés en *siphon* présentent des phénomènes analogues, et même ils ont l'avantage d'être plus commodes pour ces expériences. Dans le siphon *s* (Fig. 13), dont le diamètre est uniforme, les sommets des deux colonnes sont à la même hauteur, tant que le liquide n'atteint pas l'extrémité de la courte branche; mais dès qu'il y touche, on peut faire couler du liquide dans la longue branche, et y produire ainsi un excès de hauteur toujours croissant. A mesure que le niveau s'y élève, le ménisque de la courte branche perd peu à peu sa forme, sa concavité diminue et tend à se changer en surface plane; et si l'on observe le phénomène avec attention, il est facile de reconnaître qu'à l'instant où il atteint cette limite, la différence de niveau *ab* est précisément la hauteur à laquelle s'élève le liquide dans un tube droit de même diamètre que le siphon. Cependant on peut continuer de verser du liquide dans la longue branche; alors la surface plane qui limite la colonne à l'extrémité de la courte branche devient de plus en plus convexe, et le niveau peut ainsi monter jusqu'à une hauteur *cd* double de *ab*; à cet instant le ménisque forme une demi-sphère; et si l'on verse en-

Digitized by Google

core du liquide dans l'autre branche, sa convexité crève, et la colonne retombe plus ou moins suivant l'étendue sur laquelle peut s'étaler la goutte qui en résulte.

Ces phénomènes peuvent être produits en sens inverse, en mettant d'abord dans la longue branche du siphon toute la colonne qui peut être soutenue, et faisant sortir du liquide peu à peu par le sommet de la courte branche.

6. Dans les tubes verticaux, soit que le liquide doive y être soulevé ou déprimé, la hauteur de la colonne ne dépend que du diamètre du tube dans le point où elle s'arrête; au-dessus ou au-dessous de ce point, les dimensions n'ont plus d'influence. Ainsi, dans une cloche terminée par un tube vertical très-fin (Fig. 7), la masse entière du liquide se soutiendra à la même hauteur au-dessus du niveau, que si le diamètre de la cloche était égal à celui du tube, au point où s'arrête la colonne.

Un autre principe, non moins incontestable, c'est que la colonne soulevée dans un tube capillaire ayant une hauteur h, quand les pressions sont égales dans l'intérieur du tube et au dehors, il suffit d'augmenter de h la pression de l'air intérieur pour amener le sommet de la colonne capillaire au niveau du liquide extérieur. Après avoir vérifié ce principe par des expériences directes, Simon s'en est servi, dans le travail cité plus haut, pour déterminer la hauteur de la colonne d'eau soulevée dans des tubes très-étroits ayant des diamètres compris entre 3 dixièmes et 1 centième de millimètre. Son appareil est représenté (Fig. 14) : le tube capillaire t, qui peut être très-court, plonge à peine, par son extrémité inférieure, au-dessous du niveau de l'eau contenue dans une large capsule de verre; il est joint par son extrémité supérieure à un tube de métal qui communique au réservoir à air comprimé r; la compression se fait avec une pompe foulante qui s'adapte à la tubulure a; enfin une éprouvette bcd, pleine d'eau ou de mercure, suivant que les pressions doivent être petites ou très-grandes, donne la mesure de ces pressions. On refoule l'air graduellement, jusqu'à l'instant où l'on voit une fine bulle d'air prendre naissance dans le liquide à l'ouverture même du tube; alors l'excès de pression de l'air, transformé en colonne d'eau, donne la hauteur à laquelle l'eau serait soulevée dans le tube soumis à l'expérience. Ce procédé a un avantage, en ce que la partie efficace du tube étant précisément sa section inférieure, on peut aisément, au

Digitized by Google

moyen du microscope, mesurer le diamètre de l'ouverture et vérifier si elle est bien cylindrique; mais il manque de précision à d'autres égards, en ce que les pressions sont mesurées par une colonne de mercure qui amplifie l'erreur, et surtout en ce qu'il y a beaucoup d'incertitude sur les pressions diverses qui peuvent s'exercer sur la bulle d'air en raison de sa forme et de ses dimensions. Quand des tubes de 1, 2, 3 ou 4 centièmes de millimètre donnent des hauteurs qui, multipliées par les diamètres, forment un produit de 33 ou 34 millimètres, au lieu de 30 qu'ils devraient donner par la loi de la raison inverse des diamètres, il est, je crois, permis de douter encore que la loi soit en défaut, plutôt que l'expérience elle-même.

7. **Lames parallèles ou inclinées, espaces capillaires de diverses formes.** — La théorie indique que l'ascension d'un liquide entre deux lames parallèles est sensiblement la même que dans un tube dont le diamètre est double de la distance des lames; cette loi se trouvait vérifiée par quelques expériences de Gay-Lussac. Cependant il me semble nécessaire d'appeler l'attention sur ce point en citant les expériences de Simon qui conduisent à un tout autre résultat, comme l'indique le tableau suivant :

DISTANCE des GLACES.	HAUTEUR de la NAPPE D'EAU.	PRODUIT de la distance par la hauteur.	DISTANCE des GLACES.	HAUTEUR de la NAPPE D'EAU.	PRODUIT de la distance par la hauteur.
mm	mm	mm	mm	mm	mm
1,000	9,47	9,47	0,268	38,42	10,30
0,518	19,13	10,00	0,250	41,24	10,31
0,500	20,00	10,00	0,220	46,90	10,32
0,404	25,00	10,10	0,194	53,20	10,33
0,272	37,86	10,30	0,158	65,38	10,33

Le produit de la hauteur par la distance des lames est à peu près constant, ce qui montre que les hauteurs sont sensiblement en raison inverse des distances; mais le produit, au lieu d'être à peu près 15, comme il serait dans un tube de 2 millimètres pour la température de 16 à 20°, qui est celle des expériences de Simon, se trouve être seulement voisin de 10; c'est-à-dire que la hauteur de la colonne soulevée entre deux lames parallèles serait à peu près celle qui aurait lieu dans un tube dont le diamètre serait égal à la circonférence décrite sur la distance des la-

Digitized by Google

mes. C'est un point qu'il serait important de vérifier par de nouvelles expériences.

Lames inclinées. — La figure 9 représente deux lames inclinées qui se coupent suivant une ligne verticale : elles sont unies par deux charnières *cc'*, et peuvent être écartées plus ou moins. Lorsqu'on les plonge dans l'eau, le liquide doit monter à des hauteurs inégales en *a* et en *b*, puisque les distances correspondantes des lames sont elles-mêmes inégales, et puisque les hauteurs sont, entre les lames, comme dans les tubes, en raison inverse des distances. Il est facile de démontrer par un calcul très-simple que le sommet de la colonne forme une hyperbole équilatère dont les asymptotes sont, d'une part, la commune intersection des lames, et de l'autre le niveau du liquide dans lequel elles plongent.

La figure 10 représente deux lames qui sont de même inclinées l'une à l'autre; mais elles se coupent suivant une ligne horizontale, et le plan géométrique qui diviserait leur angle en deux parties égales peut être lui-même horizontal ou plus ou moins oblique à l'horizon. Lorsqu'on place entre ces lames une goutte d'eau qui les touche *l'une et l'autre*, on voit qu'à l'instant cette goutte s'arrondit en cercle, et se précipite vers le sommet de l'angle; sa vitesse augmente ou diminue suivant que l'angle est plus grand ou plus petit, et dans tous les cas en laissant la lame supérieure horizontale; et en inclinant convenablement la lame inférieure, on peut combattre la force attractive qui sollicite la goutte à monter vers le sommet, par la force de sa pesanteur qui la sollicite à glisser le long du plan incliné sur lequel elle repose.

Tubes coniques. — Les phénomènes dont nous venons de parler se reproduisent dans les tubes coniques, avec les mêmes circonstances et par les mêmes causes. La petite colonne *mm'* (Fig. 11) se précipite vers le sommet du cône ou vers sa base, suivant qu'elle est terminée par deux ménisques concaves ou par deux ménisques convexes, et dans les deux cas on peut la retenir dans une position fixe en inclinant convenablement l'axe du cône dans un sens ou dans l'autre.

Surfaces de différentes formes. — Ce qui précède nous montre assez clairement que les solides et les liquides ne peuvent pas se toucher sans que la surface mobile du liquide éprouve, près du contact, une déformation plus ou moins marquée.

Les inflexions de la courbure dépendent de la forme des corps. Il y a toujours ascension d'un liquide quand il mouille la surface, et dépression quand il ne la mouille pas. C'est ainsi qu'une aiguille à coudre bien lavée à l'alcool se trouve mouillée par l'eau et enfonce lorsqu'on la pose légèrement sur la surface de ce liquide, tandis qu'elle surnage si elle est un peu graissée de manière à produire autour d'elle une dépression. Les insectes qui marchent ou plutôt qui glissent sur la surface des eaux seraient bientôt submergés, si un enduit particulier n'empêchait pas qu'ils fussent mouillés par ce liquide (Fig. 8).

8. **Attractions et répulsions qui résultent de la capillarité.** — Les corps qui sont plongés dans les liquides ou qui flottent à leur surface présentent des phénomènes d'attraction et de répulsion assez remarquables pour qu'il nous semble nécessaire d'en citer quelques exemples.

Deux balles de liége posées sur l'eau et mouillées par ce liquide n'exercent aucune action l'une sur l'autre lorsqu'elles sont à une distance un peu grande; mais dès qu'on les approche à une *distance capillaire*, c'est-à-dire à une distance assez petite pour que les surfaces du liquide soulevé autour d'elles se touchent ou se croisent, il y a alors une attraction très-vive.

Deux balles qui ne se mouillent pas, comme des balles de cire ou de liége enfumées, flottantes sur l'eau, ou des balles de fer sur le mercure, exercent aussi une attraction dans les mêmes circonstances.

Enfin deux balles dont l'une se mouille tandis que l'autre ne se mouille pas, se repoussent toujours lorsqu'elles arrivent à la distance capillaire (Fig. 22).

Les lames verticales présentent des phénomènes analogues.

On avait pensé d'abord que ces mouvements résultaient d'une action directe de la matière; mais il est bien évident qu'ils dépendent des courbures des surfaces, puisque les mêmes corps qui se fuient ou qui s'attirent sur l'eau n'exercent aucune action à distance égale dans le vide, ou même dans l'air, ou dans d'autres milieux qui les enveloppent de toutes parts.

9. **Adhésion des liquides contre les surfaces solides.** — Lorsqu'un disque solide est posé sur la surface d'un liquide, on ne peut plus le soulever horizontalement comme s'il était libre dans l'air, mais il faut faire un effort un peu plus considérable. Pour mesurer cet effort, on se sert d'une balance : d'un côté on met

Digitized by Google

le disque horizontal, de l'autre on met des contre-poids, et quand l'équilibre est établi, on approche une surface liquide jusqu'à l'instant où elle touche la surface inférieure du disque; alors on ajoute peu à peu et sans secousse des poids du côté opposé, et l'on note combien il a fallu en ajouter pour rompre l'adhésion. Ce procédé a été imaginé par Taylor, et les résultats qu'en ont obtenus Cigna, Guyton et beaucoup d'autres physiciens, ont donné naissance à de longues discussions. Nous nous contenterons de rapporter ici les résultats de Gay-Lussac.

Pour détacher un disque de verre de $118^{mm},366$ de diamètre, il a fallu différents poids suivant la nature des liquides, comme on le voit dans le tableau suivant :

NOM des SUBSTANCES.	DENSITÉ.	TEMPÉRATURE.	POIDS nécessaire pour détacher un disque dont le diam. $= 118^{mm},366$.
			grammes.
Eau	1,0000	8,5	59,40
Alcool	0,8196	8	31,08
Id.	0,8595	10	32,87
Id.	0,9415	8	37,15
Essence de térébenthine	0,8695	8	34,10

Un disque de même diamètre, de cuivre ou de quelque autre substance capable d'être mouillée par les liquides, donne exactement le même résultat. Ainsi l'adhésion est, comme la capillarité, indépendante de la nature des solides et dépendante seulement de la nature des fluides. Il est facile d'en concevoir la raison, car, en se soulevant, le disque emporte toujours une couche de liquide. L'effort des poids additionnels n'est donc pas appliqué à séparer les molécules du disque des molécules du liquide, mais bien à rompre la *cohésion* qui unit les molécules liquides entre elles. Les expériences dont il s'agit donnent donc une mesure de la cohésion du liquide ou de l'attraction qu'il exerce sur lui-même, et l'on voit que cette attraction, toujours très-sensible, est variable dans les divers liquides.

Lorsque la surface du disque est de telle nature qu'elle n'est pas mouillée par le liquide, comme il arrive, par exemple, pour le mercure et le verre, alors le poids qu'on ajoute pour les séparer n'exprime plus la cohésion du liquide, mais aussi il est très-variable, et Gay-Lussac a observé que pour séparer du

Digitized by Google

mercure un disque de verre de 118mm,366 de diamètre, on devait employer tantôt 296 grammes, tantôt 158, suivant qu'on mettait un temps plus ou moins long à ajouter les poids. Cependant ces expériences font voir d'une manière frappante que, même dans le cas où un solide n'est pas mouillé par un liquide, il s'exerce encore entre les molécules du solide et celles du liquide une attraction plus ou moins forte. Cette conséquence paraît être sans exception : seulement, la cohésion du liquide est alors toujours plus grande que l'attraction que le solide exerce sur lui.

10. Divers effets de la capillarité. — Huyghens observa en 1672 (*Journal des savants*, page 111) un fait qui parut alors fort étonnant. Un tube de 70 pouces de longueur et de quelques lignes de diamètre, ayant été bien nettoyé à l'alcool, puis rempli de mercure, purgé d'air et retourné avec précaution, toute la colonne resta suspendue dans le tube, il fallut plusieurs secousses légères pour qu'elle se détachât du sommet et prît sa hauteur ordinaire de 28 pouces dans l'intérieur du tube. C'est évidemment un phénomène d'adhésion; il se reproduit toutes les fois que la surface intérieure du tube est bien nette et l'appareil bien purgé d'air.

Don Casbois fit, vers 1780, une remarque importante pour la construction des baromètres. Ayant fait bouillir le mercure pendant très-longtemps dans un tube barométrique, il s'aperçut, après l'avoir retourné, que le sommet de la colonne formait un ménisque à peu près plan, et même plutôt concave que convexe. On voit par ce qui précède que cette forme de ménisque doit avoir une grande influence sur la hauteur des baromètres qui n'ont pas, comme celui de Gay-Lussac, l'avantage d'être corrigés d'avance de tous les effets de la capillarité. La cause de ce singulier phénomène a été longtemps inconnue, et l'on doit à Dulong une observation qui l'explique complétement : Dulong a reconnu, par des expériences directes, qu'en prolongeant l'ébullition du mercure à l'air, il se forme un oxyde qui se dissout dans le liquide, et cette espèce de dissolution, assez peu différente du mercure par sa densité, en est très-sensiblement différente par ses propriétés capillaires, puisqu'elle acquiert à la fin la propriété de mouiller le verre. Ainsi, pour faire de bons baromètres à cuvette, il faut, autant qu'il est possible, éviter le contact de l'air pendant l'ébullition du mercure.

Digitized by Google

On doit au P. Abat l'expérience suivante : *abc* (Fig. 18) est un tube recourbé contenant du mercure ; le liquide s'y trouve d'abord au même niveau *ac* dans les deux branches ; mais si, après avoir un peu incliné ce tube de manière que le mercure monte vers *c'* et descende vers *a'*, on le ramène ensuite doucement dans sa première position, les sommets des colonnes ne sont plus exactement nivelés ; celui qui s'était élevé reste plus haut, et en même temps sa convexité est plus grande ; l'autre reste plus bas, et sa convexité paraît moindre. C'est un effet de la forme des ménisques, qui montre combien il faut prendre de soins dans les observations barométriques, et combien il est nécessaire à chaque fois de vaincre par de légères secousses le frottement du mercure contre le verre. Pour que le liquide prenne sa véritable hauteur, il faut, comme nous l'avons déjà dit, que le sommet de la colonne prenne sa véritable forme.

La capillarité ne se manifeste pas seulement au contact des solides et des liquides, on l'observe encore entre les solides eux-mêmes : c'est elle qui retient pressés l'un contre l'autre des plans polis de verre, de marbre, etc., même quand les pressions extérieures de l'air sont supprimées. On l'observe pareillement entre les solides et les gaz, car en mettant sous le récipient de la machine pneumatique un vase qu'on vient de remplir d'eau, on aperçoit des bulles nombreuses se former sous le liquide, tapisser toutes les parois, et grossir de plus en plus à mesure que la pression diminue. Des feuilles métalliques, comme l'or battu, présentent ce phénomène d'une manière encore plus sensible, car les bulles d'air qui se forment à leur surface après qu'on les a submergées, deviennent, sous le récipient, comme autant de petits ballons qui les font monter ou descendre suivant le degré de pression.

11. De l'endosmose. — Les phénomènes d'endosmose découverts par Dutrochet méritent d'attirer toute l'attention des physiciens et des physiologistes. Pour en mieux faire comprendre le principe, nous décrirons d'abord l'instrument au moyen duquel on peut les rendre sensibles, et que Dutrochet appelle *endosmomètre*.

L'*endosmomètre* se compose d'un tube *a* (Fig. 23), d'un réservoir évasé *b*, et d'une *cloison cd*. Le tube est de verre ; il peut avoir plusieurs décimètres de longueur et quelques milli-

Digitized by Google

mètres de diamètre intérieur; le réservoir peut recevoir diverses formes et être de verre ou de métal; dans le premier cas, on le soude au tube, ou bien on y adapte celui-ci comme un bouchon à l'émeri sur le col d'un flacon; dans le second cas, on peut les sceller ensemble avec un mastic convenable; la cloison est formée de la substance solide et essentiellement poreuse dont on veut étudier les propriétés; elle doit fermer l'ouverture du réservoir assez exactement pour que le liquide ne puisse entrer ou sortir qu'en la *traversant*.

Voici maintenant les phénomènes que l'on observe quand, par exemple, la cloison est une membrane de vessie fortement ficelée sur les bords du réservoir, et quand il y a de l'*alcool* à l'intérieur et de l'*eau* à l'extérieur. L'endosmomètre étant soutenu verticalement dans l'eau sans que la cloison touche le fond du vase, l'équilibre *mécanique* s'établit bientôt entre le liquide intérieur, le liquide extérieur et la tension de la cloison. Soient n le niveau de l'eau dans le vase, et n' le niveau de l'alcool dans l'instrument; après un quart d'heure, il y aura un changement considérable, le niveau n' se sera élevé de plusieurs millimètres, puis il continuera de s'élever; et si le tube n'a que 4 ou 5 *décimètres* de hauteur, on peut s'attendre qu'après un jour le liquide aura gagné le sommet et coulera par-dessus les bords. Voilà sans doute un phénomène bien surprenant et bien remarquable. On ne peut l'attribuer ni à la *capillarité ordinaire*, car elle serait à peine capable de maintenir l'alcool à quelques centimètres au-dessus du niveau extérieur, ni à une diminution dans la capacité du réservoir par la contraction de la vessie, car il y a au contraire augmentation sensible de capacité par le gonflement qu'elle éprouve. Enfin, l'eau s'est infiltrée à travers la vessie, car on la retrouve dans l'alcool, et elle s'est infiltrée malgré la pression qui tendait à la refouler en sens contraire, et qui tendait aussi à déprimer l'alcool pour le ramener à peu près au niveau extérieur n. Il y a donc *endosmose de l'eau à l'alcool* au moyen de la membrane de vessie, c'est-à-dire infiltration en sens contraire des *pressions hydrostatiques*. Si l'on faisait l'expérience dans un ordre inverse, en mettant l'eau en dedans et l'alcool en dehors, on ne peut guère douter que l'effet inverse ne se manifestât, et que le niveau intérieur de l'eau ne baissât au-dessous du niveau libre de l'alcool; il serait bon de le vérifier en y apportant quelques précautions qui ne sont point né-

cessaires dans l'expérience directe. On pourrait dire alors qu'il y a *exosmose* de l'eau à l'alcool ; mais il est plus simple de n'employer qu'une seule expression et de dire toujours qu'il y a *endosmose*, pourvu toutefois que l'on ait soin d'indiquer l'ordre des liquides, et de ne pas exprimer simplement qu'il y a endosmose *entre* deux liquides, mais endosmose *de l'un à l'autre*. Dutrochet a reconnu :

1° Qu'il y a endosmose de l'eau à l'eau gommée, à l'acide acétique, à l'acide nitrique, et surtout à l'acide hydrochlorique ; mais qu'il n'y a pas endosmose d'un liquide à lui-même, non plus que de l'eau pure à l'eau étendue d'acide sulfurique, ou réciproquement ;

2° Que diverses membranes végétales et animales jouissent à différents degrés des propriétés dont jouit la vessie ; que des plaques de terre cuite, d'ardoise calcinée, d'argile et en général de substances alumineuses en jouissent aussi, quoique à un très-faible degré. (Voy. *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXV et XXXVII, et l'ouvrage de Dutrochet intitulé : *De l'Agent immédiat du mouvement vital*, etc.)

Les forces capillaires telles qu'elles ont été considérées jusqu'à présent sont certainement insuffisantes pour produire ces résultats ; car elles peuvent bien élever un liquide au-dessus de son niveau, mais elles ne peuvent jamais le faire sortir du tube ou du canal qui le contient, pour l'accumuler et l'étaler sur une grande surface un peu plus élevée que le niveau primitif. Ainsi, quand on plonge dans l'eau l'extrémité inférieure d'un tube de verre un peu épais, ayant, par exemple, un centimètre de longueur et un millimètre de diamètre intérieur, le liquide est bien soulevé jusqu'au sommet, puisqu'il monterait jusqu'à 30 millimètres de hauteur ; mais, arrivé là, il s'arrête et conserve une courbure dont toute la concavité est au-dessous du plan qui termine le tube.

La même impossibilité se manifeste aussi dans les canaux capillaires les plus irréguliers. *m* (Pl. 28, Fig. 19) est une mèche de coton, une bande de drap ou une réunion de filaments capillaires quelconques, qui plonge dans l'eau par une de ses extrémités *a* ; le liquide la remplit bientôt, et lorsqu'on la courbe pour abaisser son autre extrémité *b au-dessous* du niveau *n*, on voit le liquide qui coule goutte à goutte comme dans un siphon très-étroit ; mais dès qu'on relève un peu cette extrémité pour la re-

Digitized by Google

mettre au niveau n, les gouttes cessent de se former et le liquide ne peut plus sortir.

Pour expliquer les phénomènes d'endosmose, il faut donc recourir à une force différente de la capillarité ordinaire, ou au moins à quelque nouvelle modification de cette force. C'est ce que Poisson a fait, en s'appuyant sur des considérations que nous regrettons de ne pouvoir développer ici. (Voy. la *Nouvelle théorie de l'action capillaire* de Poisson, p. 296.)

12. Indications théoriques. — La théorie des phénomènes capillaires appartenant essentiellement à l'analyse mathématique, nous devons nous borner à faire connaître les principes physiques sur lesquels les géomètres ont établi leurs calculs. Ces principes se réduisent, en dernier résultat, 1° à admettre dans chaque liquide une *force de cohésion* particulière, c'est-à-dire une force attractive entre les molécules voisines, et 2° à admettre entre les solides et les liquides une *force d'adhésion*, c'est-à-dire une autre force attractive qui agit entre leurs diverses molécules. Mais ces deux espèces de forces attractives ne pouvant être caractérisées que par leur intensité relative pour une même distance, et par la loi suivant laquelle elles décroissent à mesure que la distance augmente, on conçoit que, faute de données sur ce point, on est condamné à choisir entre une foule d'hypothèses également probables, ou du moins également possibles, et que l'explication à laquelle on arrive dépend de l'hypothèse qu'on adopte. C'est ainsi qu'on a vu paraître d'abord les théories de Jurin, Clairaut, Segner, et plus tard celle de Laplace et celle du docteur Young. Jurin attribue l'élévation de l'eau dans les tubes capillaires à l'attraction de la partie annulaire du tube à laquelle le sommet de la colonne est contigu ; Segner et le docteur Young considèrent les ménisques qui terminent les colonnes soulevées ou déprimées comme des surfaces élastiques agissant par leurs tensions ; Clairaut, sans entrer dans l'explication détaillée des phénomènes, s'élève en quelque sorte au-dessus de toutes les hypothèses par la fécondité de son analyse, et démontre ce résultat remarquable, savoir : que si la loi d'attraction de la matière du tube sur le fluide ne diffère que par son intensité de la loi de l'attraction du fluide sur lui-même, le fluide s'élèvera au-dessus du niveau, tant que l'intensité de la première de ces attractions surpassera la moitié de la seconde. Si elle en est exactement la moitié, il est facile de s'assurer que le

Digitized by Google

fluide aura dans le tube une surface horizontale, et qu'il ne s'élèvera pas au-dessus du niveau. Si les deux intensités sont égales, la surface du fluide dans le tube sera concave, de la forme d'une demi-sphère, et il y aura élévation du fluide. Si l'intensité de l'attraction du tube est nulle ou insensible, la surface du fluide dans le tube sera convexe, de la forme d'une demi-sphère, et il y aura dépression du fluide. Entre ces deux limites, la surface du fluide sera celle du segment sphérique, et elle sera concave ou convexe, suivant que l'intensité de l'attraction de la matière du tube sur le fluide sera plus grande ou plus petite que la moitié de celle de l'attraction du fluide sur lui-même.

Laplace admet que les forces attractives qui produisent les phénomènes capillaires décroissent avec une telle rapidité, qu'elles sont nulles à des distances sensibles; et quand un liquide s'élève dans un tube, il suppose qu'une couche infiniment mince de ce liquide s'attache d'abord aux parois du tube, et forme un tube intérieur qui agit seul par son attraction pour soulever la colonne et pour la maintenir à une hauteur déterminée qui dépend de la cohésion du liquide et de sa densité. C'est en partant de ces principes qu'il explique l'ensemble des phénomènes capillaires. (*Mécanique céleste*, Supplément au X^e livre.) Enfin, Poisson a introduit dans les équations générales les variations rapides de densité que les liquides éprouvent près de leurs surfaces libres ou près des parois qui les limitent, et cette considération importante lui a servi à établir une théorie nouvelle qui se trouve à l'abri des objections que le docteur Young avait élevées contre la théorie de Laplace.

Digitized by Google

CHAPITRE II.

Structure des Corps.

13. On peut étudier la structure des corps sous deux points de vue :

1° En considérant seulement leurs formes extérieures pour en déduire quelques lois générales sur leur formation, ou plutôt sur les différents modes suivant lesquels leur volume a dû prendre des accroissements successifs et toujours réguliers; 2° en observant les propriétés physiques, souvent très-diverses, que nous présente une même substance pour en déduire quelques données sur l'arrangement intérieur de ses molécules.

L'étude des formes régulières et variées que prennent les minéraux constitue à elle seule une science importante que l'on appelle *cristallographie;* mais, comme il nous serait impossible, sans nous écarter de notre plan, de donner les premières notions de cette science, nous renverrons le lecteur aux traités spéciaux.

Ainsi, nous nous bornerons à examiner les propriétés physiques des corps, et les indications qu'elles peuvent nous donner sur l'arrangement moléculaire; il n'y a sur ce point aucune théorie, ou, pour mieux dire, aucun fait complétement expliqué; nous serons donc réduit à présenter une simple énumération des phénomènes, en nous efforçant de rapprocher ceux qui paraissent dépendre des mêmes causes.

14. Les fluides, en général, soit à l'état gazeux, soit à l'état liquide, nous offrent dans toutes leurs parties une mobilité si grande qu'elle semble exclure toute idée d'arrangement déterminé. Dans une masse d'eau, par exemple, il ne faut qu'une très-petite force pour que la molécule qui est au centre se déplace et vienne à la superficie, ou pour qu'une molécule superficielle s'enfonce, au contraire, et sillonne toute la masse, suivant une route plus ou moins sinueuse. Un léger mouvement, un changement de température presque insensible, sont toujours des causes suffisantes pour produire ces déplacements et pour

Digitized by Google

bouleverser toutes les positions relatives des molécules. Ce phénomène, que nous pouvons observer en petit dans des vases transparents où flottent des poussières visibles, est un phénomène général qui se répète plus en grand dans toutes les masses fluides que nous offre la nature. Ainsi, dans le lac le plus tranquille en apparence, il y a tant de causes sans cesse changeantes qui sollicitent les molécules liquides, que l'on peut bien assurer aussi qu'elles sont à tout moment déplacées; de même, dans l'atmosphère, pendant le calme le plus absolu, on peut être bien assuré que les molécules n'ont point de repos; et si la masse d'air paraît immobile dans son ensemble, elle n'en est pas moins agitée de mille manières dans toutes ses parties. Cette circulation perpétuelle des fluides semble indiquer une parfaite homogénéité de structure; cependant dans l'ignorance où nous sommes sur les derniers éléments de la matière, nous ne pouvons rien affirmer sur l'état d'agrégation des molécules elles-mêmes : il est possible, par exemple, qu'une molécule d'eau, qui est si mobile par rapport aux molécules qui l'environnent, soit un composé de plusieurs molécules élémentaires, assemblées par des forces permanentes, et retenues à distance dans des positions parfaitement fixes; car la fixité dans la structure des molécules secondaires n'empêcherait pas leur mobilité relative. Mais, pour ne pas se faire une fausse idée de l'état d'agrégation des liquides et des gaz, il ne faut admettre implicitement ni qu'ils sont composés de molécules simples ou isolées, roulant ou glissant l'une sur l'autre avec la plus grande facilité, ni qu'ils sont composés de molécules secondaires, ou d'atomes plus ou moins nombreux, groupés d'une manière fixe, et se déplaçant tout d'une pièce, sans qu'il y ait de changement dans les positions respectives de leurs éléments; car, jusqu'à présent, il n'y a dans la science aucune donnée certaine pour lever nos incertitudes sur ce point.

Les corps solides offrent plus de prise à nos observations, parce qu'ils peuvent, pour la plupart, prendre naissance, se former et s'accroître sous nos yeux, et parce qu'ils ont en général des propriétés qui sont en rapport avec leur structure intime. Ce sont ces propriétés que nous allons étudier, en distinguant celles qui peuvent être imprimées aux corps postérieurement à leur formation, et celles qui dépendent essentiellement de leur origine, c'est-à-dire des circonstances dans lesquelles ils ont pris leur solidité.

15. *Des changements de structure que peuvent prendre les corps solides sans perdre leur solidité.*

Changement de forme des cristaux. — M. Mitscherlich, en étudiant les propriétés optiques de la chaux sulfatée, a reconnu que, dans les lames cristallisées de cette substance, la structure intérieure change avec la température, sans qu'on puisse apercevoir à l'extérieur aucune modification sensible, ni sur les côtés, ni sur les faces polies de ces lames. D'autres substances cristallisées lui ont ensuite présenté le même phénomène.

Le sulfate de nickel, en cristaux prismatiques, ayant été exposé, en été, à la lumière solaire, dans un vase fermé, les particules ont changé de position dans la masse solide, sans que l'état fluide ait eu lieu; et lorsqu'au bout de quelques jours on a brisé les cristaux dont la forme extérieure n'était point changée, on les a trouvés composés d'octaèdres à base carrée, offrant parfois un volume de plusieurs millimètres. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXVII, p. 205.)

Le séléniate de zinc à forme prismatique, exposé au soleil sur une feuille de papier, se transforme aussi en peu d'instants en cristaux octaèdres à base carrée.

Des cristaux de sulfate de magnésie et de sulfate de zinc, chauffés graduellement dans l'alcool jusqu'au point d'ébullition de ce liquide, perdent peu à peu leur transparence; et lorsqu'on les brise, on les trouve composés d'un grand nombre de nouveaux cristaux très-petits, qui sont, pour la forme, entièrement différents de ceux qu'on avait employés.

Ces faits remarquables, et bien constatés par un habile observateur, démontrent jusqu'à l'évidence que, même dans les corps solides, les molécules constituantes n'ont pas des positions relatives invariables, mais qu'elles peuvent encore changer de place, s'arranger et passer successivement par des états d'agrégation complétement différents.

De la trempe et du recuit. — L'arrangement des molécules ne se montre pas toujours par des facettes cristallines : par exemple, dans les propriétés qui résultent de la trempe, quelque tranchées qu'elles soient, il nous est à peu près impossible de démêler les diverses structures qui correspondent dans un même corps aux divers degrés de trempe; mais, comme on ne voit rien en lui qui puisse varier, excepté l'arrangement de ses molécules, on est bien porté à conclure que c'est là la cause

Digitized by Google

qui lui donne les qualités si singulières et si diverses que nous observons et dont nous allons essayer de prendre une idée.

Il n'y a que très-peu de corps qui soient susceptibles de recevoir la trempe : l'acier est du nombre, soit qu'il ait été obtenu *naturellement*, ou par *cémentation*, ou par *fusion*. Pour tremper l'acier, il suffit de le porter à une haute température et de le refroidir brusquement. Les divers degrés de trempe dépendent et de l'élévation de la température et de la rapidité du refroidissement.

En partant du *rouge blanc*, le refroidissement subit dans le mercure, dans le plomb ou dans quelque acide, donne la *trempe la plus dure ;* le refroidissement dans l'eau donne une trempe un peu moins dure, et le refroidissement dans les corps gras, comme l'huile ou le suif, paraît donner des trempes encore un peu moins dures.

En partant du *rouge rose*, du *rouge vif*, du *rouge cerise*, ou du *rouge brun*, on a des trempes toujours décroissantes, c'est-à-dire toujours moins dures, et d'autant moins que le corps refroidissant est moins actif ; ainsi, pour chacune de ces températures, l'huile paraît donner une trempe moins dure que l'eau, et l'eau une trempe moins dure que le mercure.

L'acier qui a reçu la plus forte trempe est plus cassant que le verre : il arrive assez souvent que les coins qui servent à frapper les monnaies et les médailles se brisent naturellement sans recevoir de chocs ni de pressions, même dans des lieux où la température varie peu.

Les instruments qui doivent avoir une trempe très-dure ne doivent l'avoir en général que dans une petite partie de leur volume : aussi se garde-t-on de les tremper en entier : les burins, par exemple, ne sont trempés que dans une petite partie de leur longueur, et c'est ainsi qu'ils peuvent être très-durs à la pointe, et cependant assez solides et assez résistants dans leur ensemble.

Les ouvriers qui travaillent l'acier savent donner à chaque instrument le degré de trempe qui lui convient suivant l'usage auquel il est destiné ; mais on conçoit qu'il serait bien difficile de saisir ce point avec précision, si l'on n'avait pour guide que la nuance du rouge à laquelle il faut plonger l'acier dans le mercure ou dans l'eau pour lui faire prendre toutes les qualités qu'on se propose de lui donner : aussi est-il bien rare que l'on suive cette méthode. On a un autre moyen de varier la trempe avec certi-

Digitized by Google

tude, et pour ainsi dire à volonté : ce moyen est le *recuit;* il repose sur la propriété que possède l'acier trempé dur de se détremper peu à peu suivant le degré de chaleur auquel on l'expose. On commence donc par donner une trempe trop dure, et on la réduit graduellement. La seule difficulté est d'avoir une série de caractères auxquels on puisse reconnaître les divers degrés de chaleur par lesquels on passe. Or, ces caractères se présentent d'eux-mêmes dans l'acier : lorsqu'il a été trempé et qu'on l'expose, pour le recuire, sur des charbons allumés ou seulement sur du poussier de charbon, sa surface prend des couleurs très-marquées qui changent avec la température. Ces couleurs sont les suivantes : jaune paille, rouge pourpre, bleu violet, bleu, bleu clair couleur d'eau. Il paraît qu'en partant d'une trempe dure, il faut, pour avoir la trempe des canifs et des rasoirs, arrêter le recuit au jaune paille, l'arrêter au pourpre pour avoir celle des couteaux et des ciseaux, au bleu pour celle des ressorts de montre, et seulement à la température du rouge naissant pour avoir celle des ressorts de voiture. Il est bien rare que des pièces d'acier bien dressées ne se déforment pas par la trempe, et souvent le recuit qu'elles doivent éprouver n'est pas assez grand pour qu'on puisse les redresser au marteau; c'est, par exemple, ce qui arrive aux aiguilles magnétiques, car il est bon de ne pas les recuire jusqu'au bleu. Dans ce cas on chauffe les pièces dans un tube ou dans un manchon de fer, afin qu'elles prennent plus sûrement une température uniforme dans toute leur étendue, et ensuite on les laisse tomber verticalement dans l'eau, d'une hauteur un peu grande, afin que tous les points de la surface soient saisis par le froid presque au même instant.

Le verre peut être trempé comme l'acier, et s'il est impossible de lui donner par le recuit la souplesse et l'élasticité des ressorts, il est possible au moins de diminuer beaucoup sa fragilité. Tout le monde sait comment se font les *larmes bataviques*, et comment elles se réduisent en poussière dès qu'on en brise la pointe. Puisqu'elles se forment en versant du verre fondu dans l'eau froide, et puisqu'elles éclatent en mille fragments lorsqu'on rompt en quelque point leur continuité, il est évident qu'elles sont tout à fait analogues à l'acier fortement trempé : aussi, lorsqu'on fait recuire une larme batavique jusqu'à une température voisine du rouge, elle devient comme du verre ordinaire et ne se brise plus que dans les points qui reçoivent le choc. C'est pour cela que

Digitized by Google

dans les verreries on prend grand soin de recuire les pièces qui sont soumises pendant leur fabrication à un refroidissement un peu rapide.

Nous verrons dans la polarisation de la lumière un procédé curieux pour observer l'arrangement moléculaire des corps diaphanes, et nous reconnaîtrons, par exemple, que le verre est presque toujours trempé en plusieurs points de sa masse, à moins qu'il n'ait été refroidi avec beaucoup de précautions.

Il y a une substance qui présente des phénomènes de trempe d'autant plus singuliers, qu'ils sont exactement opposés à ceux que présente l'acier : cette substance est l'alliage des instruments chinois que nous connaissons sous le nom de *tam-tam;* elle se compose de quatre parties de cuivre pour une partie d'étain. Quand l'alliage des tam-tams est lentement refroidi, il est fragile comme le verre ; au contraire, quand il est refroidi rapidement, il devient malléable, il peut être travaillé au marteau, façonné en instruments, et exécuter par son élasticité ces vibrations multipliées qui produisent des sons si graves et si pleins. C'est même d'après cette observation curieuse que nous pouvons maintenant en France exécuter des tam-tams, moins bons peut-être que ceux des Chinois, mais assez sonores cependant pour entrer dans nos orchestres.

On a coutume d'expliquer les phénomènes de la trempe du verre et de l'acier, en disant que les molécules superficielles saisies par le froid se consolident brusquement en formant une espèce de voûte qui enveloppe de toutes parts le noyau intérieur, tandis qu'il est encore très-dilaté par la chaleur : si ce noyau se refroidissait librement, il diminuerait de volume ; mais, forcé comme il l'est d'occuper en se refroidissant le même espace qu'il occupait étant très-chaud, ses molécules éprouvent une grande tension et font un effort continuel pour briser la voûte de dehors en dedans, et la brisent en effet avec explosion quand une cause extérieure vient favoriser leur action. Par cette espèce de comparaison l'on explique tout au plus la facilité avec laquelle le verre trempé se brise ou se réduit en poudre ; mais l'on n'explique ni la dureté que prend l'acier, ni l'élasticité, ni les autres propriétés remarquables qui correspondent aux divers degrés de trempe, et l'on n'explique pas à plus forte raison ce qui arrive à l'alliage des tam-tams. On a coutume de dire aussi que les autres corps n'ont pas la propriété de se

Digitized by Google

tremper ; mais cela signifie seulement qu'ils n'ont pas la propriété de devenir fragiles par le refroidissement, car il est bien probable que tous les corps brusquement refroidis diffèrent des corps recuits par quelques propriétés physiques, comme ils en diffèrent par leur densité ou par la marche de leur dilatation.

De l'écrouissage. — Lorsqu'un corps métallique peut être martelé à froid sans se rompre et sans se gercer, il devient ordinairement plus ferme, plus élastique, plus sonore, et l'on dit alors qu'il est *écroui*. Le laiton, l'argent, le cuivre, l'étain et même le plomb présentent de grandes différences dans leurs propriétés lorsqu'ils ont été simplement fondus et refroidis, ou lorsqu'ils ont reçu un écrouissage convenable. Ce qui se produit par le marteau se produit encore à un degré plus ou moins marqué par l'action de la lime, par celle du burin et par les pressions qui s'exercent dans les trous des filières ou entre les cylindres des laminoirs. Lorsqu'un métal a été trop fortement écroui par l'une ou l'autre de ces actions mécaniques, il devient cassant au point qu'il est impossible de le courber ou même de continuer sur lui le même travail sans le voir se rompre ou se gercer. Alors on le fait recuire comme l'acier qui a reçu une trempe trop dure, et l'on peut sans danger le reporter sous le marteau ou lui donner d'autres *traits* à la filière. Toutes ces propriétés méritent quelque attention de la part des physiciens, car elles peuvent avoir une influence sur beaucoup de phénomènes, tels que l'élasticité, la dilatation, la conductibilité pour la chaleur ou pour l'électricité, et particulièrement sur les irrégularités que présentent quelquefois les instruments de précision ; car il suffit, par exemple, qu'un cercle soit inégalement écroui dans les divers points de son contour ou de son épaisseur pour qu'il se tourmente et se gauchisse avec le temps.

16. *Des propriétés que prennent les corps en se consolidant après une fusion complète ou incomplète.*

Cristallisation de l'eau. — Il y a peu d'observateurs qui n'aient eu la curiosité d'examiner la congélation de l'eau, et de suivre l'accroissement des fines aiguilles de glace qui se forment d'abord à la superficie ou sur les solides qu'elle touche. D'un instant à l'autre ces aiguilles se développent et se ramifient de mille manières par le progrès de la solidification. Il est rare, à la vérité,

Digitized by Google

qu'elles prennent des formes cristallines régulières comme celles que l'on observe dans le givre ou la neige (voy. la *Météorologie*); mais leur aspect suffit cependant pour montrer comment les corps solides se constituent, et comment, dans un volume donné de glace, on peut concevoir une infinité de surfaces courbes, qui séparent ce qui a été solide dans un moment de ce qui a été solide dans l'instant suivant. C'est au reste ce que nous allons mieux voir encore par d'autres exemples.

Cristallisation du soufre. — Un cylindre de soufre paraît à peu près homogène à l'extérieur; mais, lorsqu'on le brise, on voit autour de son axe une infinité de petites aiguilles transparentes qui se croisent sous tous les angles. Cette cristallisation régulière s'est opérée dans l'intérieur, parce que le refroidissement y a été plus lent qu'à l'extérieur. En effet, la grandeur des cristaux dépend de la masse qui était en fusion et de la rapidité de son refroidissement. En faisant fondre ensemble 50 livres de soufre, M. Mitscherlich a obtenu des cristaux de plus d'un centimètre d'épaisseur qui avaient une grande régularité. Le bain était refroidi lentement pendant quatre ou cinq heures, et l'on perçait la croûte épaisse qui s'était formée au-dessus pour *décanter* le liquide intérieur. Ces cristaux, une fois formés, ne se seraient pas sans doute décomposés pendant la solidification du liquide restant; ils se seraient seulement enveloppés de nouvelles couches solides plus ou moins régulières, et lorsqu'on aurait brisé la masse après une solidification complète, *sans décantation*, la cassure, tout en présentant quelques facettes cristallines, n'aurait pu donner une juste idée de l'état d'agrégation des molécules.

Cristallisation du bismuth.—Le bismuth très-pur est, parmi tous les métaux, celui qui cristallise avec la plus grande facilité; on le fait fondre dans un creuset, on le verse dans un test un peu chauffé d'avance, et l'on attend que la croûte superficielle ait acquis une solidité convenable; alors on *décante*, c'est-à-dire que l'on prend le test comme pour verser ce qu'il contient; le liquide intérieur coule après avoir percé la croûte par son poids, et la calotte solide qui reste attachée au test présente de beaux et larges cristaux irisés, formant par leur arrangement mille reflets et mille accidents singuliers.

Cette expérience curieuse et la précédente sont bien propres

Digitized by Google

à nous faire concevoir la structure intérieure des corps ; ce n'est qu'en suspendant ainsi leur formation, et en séparant à un instant donné ce qui est déjà solide de ce qui reste encore liquide, que l'on peut se faire une idée des groupements moléculaires qui constituent les masses. Et comme les cristaux qu'on obtient par ce procédé dépendent, pour leur grandeur et leur arrangement, de la vitesse avec laquelle la masse se refroidit, on ne peut douter que toute la texture d'un corps solide quelconque ne dépende des circonstances sous lesquelles il s'est consolidé.

Consolidations sous diverses pressions. — La pression sous laquelle se trouve le liquide au moment où il se solidifie exerce aussi, pour l'ordinaire, une influence marquée sur l'état d'agrégation qui en résulte. Ainsi, lorsqu'on jette dans le moule une cloche de grandes dimensions, les couches inférieures ne prennent pas exactement la même texture que les couches supérieures ; il en est de même pour les canons, et l'on sait qu'il n'est pas indifférent de les jeter dans un moule horizontal ou vertical, ni de les forer en plaçant l'âme à la partie supérieure ou inférieure du cylindre de coulée.

De la fonte et de l'acier fondu. — Il y a des corps qui semblent changer de nature par des fusions répétées : tels sont le laiton, la fonte et l'acier ; mais on peut remarquer en général que ces modifications ne se montrent que dans les corps composés qui peuvent éprouver quelque altération dans les proportions de leurs principes constituants, soit par la haute température à laquelle ils sont soumis, soit par l'action des corps étrangers avec lesquels ils sont en contact. Ainsi, quand la fonte douce devient aigre par une seconde ou par une troisième fusion, il est probable que cet effet singulier ne tient pas seulement à des états d'agrégation différents, mais bien à des proportions variables de charbon que l'analyse chimique ne peut assigner. Il en est sans doute de même pour l'acier fondu, car de très-petites différences dans les proportions du charbon pourraient donner des états cristallins très-différents à l'œil.

Du fer. — Il paraît que le fer du commerce le mieux purifié contient encore des traces de charbon, et comme dans cet état on éprouve déjà de grandes difficultés à le mettre en fusion, l'on peut conclure que du fer absolument pur serait excessivement difficile à fondre, surtout à cause de la nécessité où l'on serait d'éviter le contact de toutes les matières charbonneuses. Ce

n'est donc pas par une fusion complète que l'on obtient le fer dans les arts, mais seulement par une fusion pâteuse, qui donne aux molécules assez de liberté pour qu'elles puissent s'arranger et même former divers systèmes cristallins, très-perceptibles dans la cassure. Ce métal nous donne donc une nouvelle preuve que, même à l'état solide et sans liquéfaction, les molécules peuvent se déplacer et s'agréger par leur affinité mutuelle, de manière à produire des cristaux plus ou moins volumineux. Car les martinets qui corroient le fer, et les cylindres qui le compriment pour en chasser les scories liquides, peuvent bien lui donner de la ténacité; mais à coup sûr ces forces mécaniques sont peu propres à déterminer les cristallisations régulières qu'on y observe souvent.

Du platine. — Le platine en petites masses peut bien être fondu par l'action de la pile ou par celle d'un chalumeau à gaz oxygène, mais il est si réfractaire que nos moyens les plus efficaces ne peuvent en fondre que des parcelles. Cependant on sait à présent l'obtenir en grande masse; on le passe à la filière, on le lamine, on le travaille au marteau pour en faire des fils, des tubes, des creusets, des cornues, des siphons, des chaudières et plusieurs autres instruments qui sont d'une grande utilité dans la chimie et dans les arts. Toutes ces formes qu'il peut prendre supposent entre ses molécules une affinité puissante et une mobilité assez grande pour qu'elles puissent s'arranger sans que la masse soit liquéfiée. Pour mieux faire comprendre cette vérité, il suffit de rappeler en peu de mots la série des manipulations que reçoit le platine pour être tiré du minerai et transformé en une masse solide.

D'abord on fait passer le minerai par une série de dissolutions qui ont pour objet de séparer le platine des nombreux métaux auxquels il est allié, et l'on arrive enfin à une dissolution qui ne contient plus que de l'hydrochlorate de platine et d'ammoniaque.

Ce sel double se précipite par l'évaporation en une poudre dont la couleur est un jaune orangé assez éclatant.

On l'expose à une haute température, et tout se vaporise, excepté le platine qui reste en masse spongieuse, plus friable que de la cendre agglomérée par le feu. C'est avec cette poussière infusible que l'on parvient à faire une masse solide et homogène.

Digitized by Google

L'art de la verrerie, la fabrication des porcelaines et des poteries, offrent une foule d'exemples de divers modes d'agrégation par lesquels peuvent passer les corps solides soumis à l'action du feu.

17. Des propriétés que prennent les corps en se précipitant des dissolutions qui les contiennent. — S'il y a, comme nous venons de le voir, un grand nombre de corps solides que l'on peut obtenir par la voie sèche ou par l'action du feu, il y en a beaucoup d'autres que l'on ne peut obtenir que par la *voie humide*, c'est-à-dire par des liquides qui les prennent en dissolution et qui les laissent déposer par l'évaporation. C'est ainsi, par exemple, que le sel ordinaire se produit dans les marais salants par l'évaporation de l'eau de mer, et que le sucre solide se tire des sucs de cannes ou de betteraves convenablement évaporés. Les corps que l'on obtient par cette voie peuvent prendre des structures encore plus distinctes et plus variées dans leurs apparences que ceux que l'on obtient par le feu. Quand l'évaporation s'accomplit lentement dans un lieu tranquille, sans variations sensibles de température, le corps solide qui se dépose s'arrange en beaux cristaux parfaitement réguliers, transparents pour l'ordinaire, et terminés par de larges faces planes et polies; mais quand l'évaporation est très-rapide, le corps solide se précipite en poudre opaque, qui n'offre aucune trace de régularité ni d'agrégation. Entre ces deux extrêmes, il est vrai de dire en général que le corps solide prend en se précipitant toutes les nuances de structure que l'on peut imaginer, depuis l'état pulvérulent le plus informe jusqu'à l'état cristallin le plus parfait. Ainsi la pierre à bâtir ordinaire (*carbonate de chaux*) et le beau marbre blanc de Carrare ou de Paros ne sont qu'une même substance qui a pris à son origine des états d'agrégation différents; le marbre lui-même n'est encore qu'une *cristallisation confuse*, car elle est sans transparence, et il y a bien des degrés intermédiaires entre sa structure et celle des cristaux limpides du *spath d'Islande*. Pareillement le charbon, la houille, le lignite, l'anthracite et le diamant ne sont qu'une seule et même substance diversement agrégée.

Les substances qui se déposent en cristallisant dans les dissolutions aqueuses se combinent ordinairement avec une certaine quantité d'eau qu'elles conservent à l'état sec, et que l'on appelle l'*eau de cristallisation*.

Digitized by Google

M. Haidinger avait observé, et M. Mitscherlich a confirmé par un grand nombre de faits cette vérité importante, qu'une même substance, en cristallisant à diverses températures, peut prendre des proportions variables d'eau de cristallisation et en même temps affecter des formes différentes. Ainsi le sulfate de soude, qui est, comme on sait, plus soluble à 33° qu'à tout autre degré de chaleur moindre ou plus élevé, cristallise à cette température sans eau de cristallisation, tandis qu'à la température ordinaire il prend de l'eau et une tout autre forme.

Le séléniate de zinc peut prendre trois proportions d'eau et trois formes distinctes, suivant qu'on le fait cristalliser dans une dissolution chaude, dans une dissolution tempérée ou dans une dissolution convenablement refroidie.

M. Ebelmen, en prenant l'acide borique fondu comme dissolvant de l'alumine, de la magnésie, de la glucine et des oxydes métalliques, est parvenu à faire de petits cristaux de la famille des spinelles et d'autres pierres fines, à la température des fours de porcelaine qui suffit pour vaporiser l'acide borique. (*Comptes rendus*, 16 août 1847.)

Digitized by Google

CHAPITRE III.

De l'Élasticité.

18. Tous les corps sont élastiques, c'est-à-dire qu'ils peuvent tous, sans se rompre ou se désagréger, éprouver par des actions mécaniques quelques changements dans leur structure, leur forme ou leur volume, et reprendre *exactement* leur état primitif dès que ces puissances mécaniques cessent d'agir sur eux. Nous avons déjà fait voir que les volumes des gaz dépendent des pressions qu'ils supportent, et qu'à température égale ils reprennent toujours le même *volume* sous la même pression; cette propriété constitue une espèce d'élasticité que nous appellerons *élasticité de compression;* c'est la seule dont jouissent les gaz, et à peu près la seule aussi dont paraissent jouir les liquides. Les solides la possèdent comme les liquides et les gaz, mais en outre ils peuvent être fléchis ou allongés, et reprendre leurs dimensions ou leur *forme*, ce qui constitue l'*élasticité de tension;* enfin ces corps peuvent être plus ou moins tordus sans cesser de revenir à leur position primitive, ce qui constitue l'*élasticité de torsion.* Nous allons successivement étudier ces diverses propriétés.

19. **De la compressibilité des liquides et de la chaleur qui en résulte.** — L'appareil au moyen duquel OErsted a observé la compressibilité des liquides est représenté (Pl. 28, Fig. 24); il se compose essentiellement d'un réservoir de compression, de verre épais *a*, et d'un réservoir à tube capillaire *b* que l'on appelle un *piézomètre*, qui est représenté plus en grand dans la figure 25; on voit que le tube se termine par un petit entonnoir. Un point important pour l'exactitude de l'instrument est de graduer ce tube en parties égales qui soient une fraction connue de la capacité entière du réservoir piézométrique; pour cela on détermine le poids du mercure contenu dans le piézomètre, qui sera, par exemple, 1000 grammes, et le poids du mercure contenu dans une longueur donnée du tube, qui sera par exemple 2 décigr. pour une longueur de 100 millimètres. Alors il est évident que la capacité correspondante à 1 millimètre du tube (supposé bien calibré) sera 0,000002 de la capacité du cy-

Digitized by Google

lindre, et comme on peut lire aisément les demi-millimètres, soit sur le tube lui-même divisé au diamant, soit sur une échelle qui lui est adaptée, on pourra observer les millionièmes du volume primitif.

Supposons maintenant que l'on veuille employer ce piézomètre à déterminer la compressibilité de l'eau : on le remplit de ce liquide bien purgé d'air, et, par de légères variations de chaleur, on fait pénétrer dans le tube une petite colonne d'air, de mercure ou de carbure de soufre, qui sépare et limite le volume d'eau sur lequel on veut opérer. Le piézomètre ainsi ajusté, on adapte sur son échelle un petit manomètre à air *c*, c'est-à-dire un tube cylindrique de 10 à 15 millimètres de diamètre, de 15 à 20 centimètres de longueur, fermé en haut, et ouvert en bas; on le porte dans le réservoir de compression, préalablement rempli d'eau, en prenant toutes les précautions nécessaires pour qu'il n'éprouve aucun changement sensible de température, car il ne faudrait peut-être qu'un demi-degré d'élévation pour repousser l'index dans l'entonnoir, et un ou deux degrés d'abaissement tout au plus pour le faire tomber dans le cylindre. Il reste à comprimer la grande masse d'eau du réservoir, afin qu'elle transmette sa pression au liquide contenu dans le piézomètre au moyen de l'ouverture de l'entonnoir; pour cela on visse la pompe sur la forte virole de métal *e* qui termine le réservoir de verre, et l'on serre fortement avec une clef *f* pour intercepter tous les joints. On voit en *g* un tube à robinet par lequel on verse de l'eau jusqu'au piston *h*, placé d'abord au plus haut point de sa course; pendant ce temps-là, l'air s'échappe par l'ouverture latérale *i*, qui doit à son tour être fermée par le piston dès qu'il commence à descendre. Enfin, cela fait, il suffit de tourner la traverse *k* pour faire descendre dans son écrou la vis *l*, qui pousse le piston devant elle, et alors on observe en même temps le manomètre, pour avoir la mesure de la pression, et l'index du piézomètre pour avoir la diminution de volume correspondante. Ce résultat direct doit toutefois subir une correction : Poisson admettait que la capacité du piézomètre diminue pendant la compression et qu'elle devient : $c\left(1-\frac{3\delta}{2}\right)$ sous la pression p, δ étant la contraction qu'éprouverait dans sa longueur une tige de même substance que le piézomètre, et supportant à ses deux bouts *seulement* la même pression p, rapportée à l'unité de surface.

Digitized by Google

Si, au lieu de presser cette tige, on la tirait dans sa longueur avec le même effort, on suppose qu'elle prendrait le même allongement δ; ainsi, d'après les expériences de MM. Colladon et Sturm, une baguette de verre s'allongeant de 11 dix-millionièmes lorsqu'elle est tirée avec un effort égal à une atmosphère, c'est-à-dire de 1^k par centimètre carré, il en résulte que c étant la capacité d'un piézomètre de verre sous la pression ordinaire, cette capacité devient $c\,(1 - 0{,}00000165\,n)$, sous un nombre n d'atmosphères de plus. En adoptant donc l'allongement du verre observée par MM. Colladon et Sturm, et en corrigeant les observations directes d'après cette donnée, on obtient les résultats contenus dans le tableau suivant :

Tableau de la compressibilité des liquides.

NOMS DES SUBSTANCES.	COMPRESSIBILITÉ POUR UNE ATMOSPHÈRE évaluée en millionièmes du volume primitif.	
	COLLADON ET STURM.	OERSTED.
Mercure	3,38	2,65
Acide sulfurique	30,35	»
Acide nitrique	30,55	»
Sulfure de carbone	»	34,65
Ammoniaque	33,05	»
Acide acetique	40,55	»
Eau non privée d'air	47,85	»
Eau privée d'air	49,65	46,65
Éther nitrique	69,85	»
Essence de térébenthine	71,35	»
Éther acétique	77,65	»
Éther hydrochlorique	84,25 p. la 1re atm.	»
Id.	80,60 p. la 9e atm.	»
Alcool	94,95 p. la 1re atm.	21,65
Id.	91,85 p. la 9e atm.	»
Id.	87,35 p. la 24e atm.	»
Éther sulfurique à 1°	131,35 p. la 1re atm.	61,65
Id.	120,45 p. la 24e atm.	»
Id. à 11°	148,35 p. la 1re atm.	»
Id.	139,35 p. la 24e atm.	»

Dans un très-bon travail sur l'*Équilibre des corps solides homogènes* (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXIII, ann. 1848), M. Wertheim a fait voir que la capacité du piézomètre diminue en effet par la pression, mais qu'elle devient

$$c(1 - 3\delta).$$

Digitized by Google

Ainsi la correction est en réalité double de celle qui avait été indiquée par Poisson. En adoptant ce résultat, tous les nombres du tableau précédent devraient être augmentés de 1,65; par exemple, la compressibilité de l'eau serait de 50,30, au lieu de 49,65.

M. Grassi, au moyen de l'appareil de M. Regnault que nous décrivons plus loin, a fait avec beaucoup de soin et de persévérance un grand nombre d'expériences de compressibilité, il en a calculé les résultats en se servant des formules que M. Wertheim a établies pour les appareils de cette espèce. On verra par le tableau suivant, que j'extrais des *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXI, ann. 1851, que les nombres de M. Grassi s'accordent très-bien avec ceux de MM. Colladon et Sturm, et les confirment d'autant mieux que les méthodes expérimentales et les méthodes de calcul sont très-différentes.

NOMS DES SUBSTANCES.	TEMPÉRATURE.	DENSITÉ.	COMPRESSIBILITÉ pour une atmosphère évaluée en millionièmes du vol. primitif
Mercure	0°,0	13,596	3,0
Eau	0 ,0	0,99988	50,3
Id.	4 ,1	1,00000	49,9
Id.	25 ,0	0,99708	45,6
Id.	53 ,0	0,98673	44,1
Ether	0 ,0	0,73770	111,0
Id.	14 ,0	0,73770	140,0
Alcool	7 ,3	0,810 à 0°	82,8
Id.	13 ,1	»	90,4
Esprit de bois	13 ,5	0,82706	91,3
Chloroforme	8 ,5	1,52250	62,5
Id.	12 ,0	»	64,8
Chlorure de calcium, n° 1	17 ,5	1,218	30,6
Id. n° 2	15 ,8	1,417	20,6
Id. *Id*	41 ,3	1,339	22,9
Chlorure de sodium n° 1	18 ,1	1,123	32,1
Id. n° 2	18 ,1	1,202	25,7
Id. *Id*	39 ,6	1,188	26,3
Iodure potassique	15 ,5	1,694	26,0
Azotate de soude	18 ,1	1,203	29,5
Carbonate de soude	16 ,6	1,182	29,7
Eau de mer	17 ,5	1,02640	43,6
Acide sulfurique + 2HO	13 ,6	»	24,2
Id. + 3HO	14 ,6	»	25,0
Id. + 4HO	16 ,5	»	27,1
Id. + 5HO	14 ,7	»	27,9
Id. + 6HO	14 ,2	»	28,3
Id. + 10HO	14 ,6	»	31,5

On doit remarquer que la compressibilité de l'eau augmente

Digitized by Google

très-peu avec la température, que celle de l'éther, de l'alcool et du chloroforme prend un accroissement plus considérable. Quant à l'influence de la pression, M. Grassi a constaté qu'elle est surtout sensible pour l'alcool, l'éther et le chloroforme; la compressibilité de ces trois liquides est un peu plus que proportionnelle à la pression qu'ils supportent.

La chaleur qui se dégage pendant la compression des liquides est toujours si faible qu'elle n'a pu être observée avec certitude.

L'appareil de M. Regnault, dont nous venons de parler, est représenté (Pl. 28, Fig. 15, 16, 17); il m'a paru inutile d'y joindre un réservoir d'une centaine de litres dans lequel on comprime de l'air à 8 ou 10 atmosphères, ainsi que la pompe qui sert à opérer cette compression, bien que ces deux pièces en soient des parties indispensables; mais leur disposition est plus facile à comprendre que celle de l'appareil lui-même, qui a cependant le mérite d'être simple et très-ingénieusement combiné. Le piézomètre *ab* est rempli de liquide jusqu'au point *c*, vers le milieu de la partie visible de sa tige; à son extrémité supérieure, il porte une garniture munie de deux robinets *p* et *d*, le premier servant à produire la pression, et le second à produire la dépression, c'est-à-dire à mettre le liquide en communication avec l'atmosphère. Le réservoir *r* dans lequel plonge le piézomètre, est presque entièrement rempli d'eau; on a aussi le moyen d'y produire la pression et la dépression au moyen des deux robinets *p'* et *d'*; il est de cuivre et suffisamment épais; à sa partie supérieure il porte une bride sur laquelle se boulonne le couvercle. La tige du piézomètre passe par une douille de ce couvercle, et doit y être solidement retenue par du mastic à la résine. Ces deux pièces faisant ainsi corps ensemble sont simplement posées sur les bords de l'ouverture circulaire de la planche *k*, qui repose elle-même sur le vase *v*; celui-ci, par la masse d'eau qu'il contient, est destiné à empêcher les variations de température dans le piézomètre.

Voici maintenant la manière d'opérer : M. Regnault fait avec le cathétomètre cinq observations successives du sommet *c* de la colonne piézométrique.

1° Les deux robinets *d* et *d'* étant ouverts, tout l'appareil se trouve sous la pression atmosphérique.

2° *d* étant fermé et *p* ouvert, la pression de l'air comprimé dans le grand réservoir arrive par le tube *t* et se fait sentir sur

Digitized by Google

le liquide du piézomètre, tandis que le réservoir *r* qui l'enveloppe reste sous la pression atmosphérique.

3° *d'* étant fermé comme *d*, et *p'* ouvert comme *p*, il y a pression égale sur le liquide et sur l'enveloppe; c'est-à-dire pression intérieure et extérieure.

4° *p* étant fermé et *d* ouvert, il y a pression extérieure seulement.

5° Enfin *p'* étant fermé et *d'* ouvert, on retombe sous la pression atmosphérique pour le liquide et pour l'enveloppe.

On comprend que pendant cette série qui constitue une opération, la pression reste bien constante, car on ne fait qu'une dépense d'air imperceptible. Le manomètre qui indique la pression du grand réservoir d'air est représenté à part dans la figure 16; le tube manométrique a 2 mètres de hauteur, et se compose de deux tubes de différents diamètres, comme l'indique la figure, et comme on le voit plus en grand dans la figure 17, qui représente la soudure de jonction du tube large et du tube étroit.

Au reste, s'il se manifeste quelque diminution sensible, aussitôt avec la pompe de compression qui est toujours prête, on rétablit la pression voulue.

20. De l'élasticité de tension et de flexion; du coefficient d'élasticité et de la ténacité. — Les corps solides travaillés en fils, en tiges ou en barres, présentent divers phénomènes lorsqu'ils sont tirés dans le sens de leur axe par des forces successivement croissantes : 1° leur longueur augmente et leur diamètre diminue; 2° ils reviennent exactement à leurs dimensions primitives quand les forces tractives viennent à cesser sans avoir dépassé certaines limites; 3° au delà de ces limites, ils restent allongés dans un sens et rétrécis dans l'autre; 4° pour des forces plus grandes encore, ils se rompent, tantôt brusquement dans toute leur largeur, tantôt lentement en s'amincissant de plus en plus.

Augmentation de volume par la traction. — Il est naturel de supposer que pendant la traction le volume du corps augmente à peu près comme il diminue pendant la compression. Poisson avait admis que l'augmentation de l'unité de volume était égale à la moitié de l'augmentation produite par la traction dans l'unité de longueur; mais M. Wertheim a démontré par des expériences très-précises que pour des cylindres ou des tubes étirés

dans le sens de l'axe et dans les limites de leur élasticité, si la longueur l devient $l\,(1+a)$, le volume v devient seulement

$$v\left(1+\frac{a}{3}\right),$$

c'est-à-dire que, par l'effet de la traction, le diamètre d se contracte et devient $d\left(1-\frac{a}{3}\right)$.

Coefficients d'élasticité. — Pour démontrer *que les fils et les tiges ont une élasticité parfaite entre certaines limites et qu'ils prennent des allongements proportionnels aux forces de traction*, l'on emploie des procédés différents. Lorsqu'il s'agit de fils très-flexibles, voici l'appareil dont on peut faire usage : un rectangle de fer ff' (Fig. 26) très-fort est disposé horizontalement à une hauteur convenable ; vers ses extrémités, il porte des montants verticaux armés de pinces, p et p' ; le fil que l'on veut soumettre à l'expérience est fixé à l'une des pinces et tendu horizontalement par un poids connu. Lorsqu'il a pris sa tension, l'on serre la seconde pince pour avoir exactement la longueur sur laquelle on opère. Près de l'appareil, on dispose un cathétomètre, et l'on observe la hauteur du milieu du fil; ensuite on le charge successivement de différents poids au moyen d'un petit bassin muni d'un crochet. On observe de nouveau la position du milieu du fil, et l'on a ainsi d'une manière très-exacte la hauteur de la flèche mm'. Alors il suffit de calculer le triangle rectangle $mm'p$, pour en déduire $pm'-pm$ ou la moitié de l'allongement; quant à la tension que le fil éprouve, on la déduit, par les règles ordinaires de la mécanique, des poids dont on a chargé le bassin.

Lorsqu'il s'agit au contraire de démontrer ces lois pour des tiges fortes et rigides, on peut les disposer verticalement, les fixer à leur partie supérieure, les charger à leur partie inférieure, puis, avec le cathétomètre, observer les allongements. Savart a fait ainsi un grand nombre d'expériences qui font partie de son beau travail sur les vibrations longitudinales des verges; nous rapporterons ici l'un des tableaux contenus dans son Mémoire.

SUBSTANCES.	DIMENSIONS.		POIDS TENDANTS.						
	Longueur totale.	Diamètre.	0k	5k	10k	15k	20k	25k	30k
			LONGUEUR DE LA PARTIE MESURÉE.						
	m	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Cuivre.	1,3190	2,77	950,53	950,59	950,65	950,71	950,77	950,81	950,90
Cuivre.	1,3190	2,77	475,25	475,28	475,33	475,36	475,38	475,42	475,45
Cuivre.	1,3000	1,30	950,59	950,84	951,16	951,45	951,70	952,00	952,27
Laiton.	1,3165	2,90	950,82	950,90	950,97	951,04	951,12	951,20	951,27
Acier.	1,3184	2,77	950,25	950,29	950,34	950,38	950,44	950,46	950,50
Fer.	1,3150	2,90	950,50	950,54	950,57	950,60	950,62	950,65	950,68
Verre.	0,976	3,817	936,69	936,76	936,83	950,91	936,96	937,04	937,12
Verre.	0,939	4,073	937,04	937,12	937,16	937,22	937,27	937,31	937,39
Verre.	0,980	7,55	937,39	937,40	937,43	937,45	937,46	937,48	937,50

Cependant le premier procédé peut s'appliquer aussi aux tiges ou aux barres de grandes dimensions et de différentes formes : pour cela on les pose sur deux appuis et on les charge de divers poids, bien exactement au milieu de l'intervalle des supports, et l'on observe au cathétomètre ou autrement les flèches qui mesurent les flexions relatives à chaque poids. On démontre en mécanique la liaison qui existe entre les divers éléments du problème : s'il s'agit, par exemple, de pièces ayant la forme d'un prisme rectangulaire, on a

$$e = \frac{2p(2a)^3}{4 . b . c^3 . f},$$

$2a$ est la distance des appuis, $2p$ le poids qui charge la pièce, f la flèche correspondante, b la *largeur* de la pièce, ou le côté horizontal du rectangle, et c son côté vertical, ou la *hauteur* de la pièce.

Pour un cylindre on a

$$e = \frac{2p(2a)^3}{4 . \pi r^4 . f},$$

r étant le rayon du cylindre.

e est ce que l'on nomme le *coefficient d'élasticité* de la substance ; c'est le poids qui serait nécessaire, en exerçant son effort sur un prisme dont la section est égale à l'unité de surface, pour produire un allongement égal à la longueur primitive de ce prisme. Ainsi, pour le fer, on a $e = 20\,000\,000\,000$ de kilogrammes, en prenant le mètre pour unité de longueur, c'est-à-

dire qu'il faudrait un poids de vingt billions de kilogrammes pour produire un allongement de 10 mètres dans un prisme de fer d'un mètre carré de section et de 10 mètres de longueur, ou un allongement de 20^m dans un prisme de 20^m et d'un mètre de section, etc.

Cette définition suppose essentiellement que les allongements sont proportionnels aux efforts de traction : or, si au lieu d'exercer une traction égale à e, on exerce seulement une traction 20 000 fois plus petite ou de 1 million de kilogr. par mètre carré, ce qui revient à 1 kilogr. par millimètre carré, l'allongement sera 20 000 fois moindre, c'est-à-dire $\frac{1}{20\,000}$ de la longueur primitive. Ainsi, en divisant la valeur de e par un million, et l'unité par le quotient qui en résulte, on a l'allongement qui correspond à une traction de 1 kilogr. par millimètre carré.

La valeur de e étant caractéristique pour chaque substance, il importe de la déterminer avec soin, et la formule précédente indique qu'il suffit pour cela d'observer la flèche f correspondante au poids $2p$ exprimé en kilogr., après avoir déterminé d'avance la distance $2a$ des appuis, la largeur et la hauteur de la pièce soumise à l'expérience, en prenant partout le mètre pour unité de longueur.

Il est même plus exact de faire deux observations, l'une avec un poids $2p$, et l'autre avec un poids $2p'$, car f et f' étant les flèches correspondantes, on a pour le prisme

$$e = \frac{(2p' - 2p)(2a)^3}{(f' - f)4 . b . c^3},$$

et pour le cylindre

$$e = \frac{(2p' - 2p)(2a)^3}{(f' - f)4 . \pi r^4},$$

Il suffit alors d'observer le poids additionnel $2p' - 2p$, et l'augmentation de flèche $f' - f$.

C'est ainsi que l'on a déterminé les coefficients d'élasticité pour le fer, la fonte et le bois.

Valeurs de e ou coefficients d'élasticité.

Fer	20 000 000 000 kilogr.	Duleau.
	23 000 000 000	Tredgold.
	21 193 000 000	Savart.
Fonte	9 029 000 000	Rondelet.
	12 000 000 000	Tredgold.
	11 530 000 000	*Id.*

Acier....	18 194 000 000....................	Savart.
Cuivre...	13 147 000 000....................	*Id.*
	10 767 000 000....................	*Id.*
	12 494 000 000....................	*Id.*
Laiton....	9 815 000 000....................	*Id.*
Verre....	5 847 000 000....................	*Id.*
	5 993 000 000....................	*Id.*
	5 234 000 000....................	*Id.*
Bois de chêne.	1 012 000 000....................	Duhamel.
	1 688 000 000....................	Ch. Dupin.
	1 300 000 000....................	Rondelet.
	1 510 000 000....................	Barlow.
	683 000 000....................	*Id.*
Bois de sapin..	1 029 000 000....................	Ch. Dupin.
	1 300 000 000....................	Rondelet.
	934 000 000....................	Barlow.

Il résulte de ce que nous venons de dire, que l'allongement qu'éprouve un prisme de ces différents corps, de longueur l, et chargé à raison d'un nombre k de kilogrammes par millimètre carré, est exprimé par

$$\frac{1\,000\,000\,.\,kl}{e},$$

Cet allongement absolu sera exprimé en mètres, centimètres ou millimètres, suivant que la longueur l sera elle-même exprimée par l'une ou l'autre de ces unités.

Réciproquement, cet allongement étant connu, ainsi que les autres données, on en peut déduire les valeurs de e; c'est ainsi que j'ai déduit du tableau des observations de Savart, rapportées plus haut, les coefficients d'élasticité du fer, de l'acier, du cuivre, du laiton et du verre, pour les introduire dans le tableau précédent. On verra avec satisfaction que des expériences faites par des procédés si peu semblables et dans des conditions si différentes, donnent cependant pour le fer le même résultat.

Ces valeurs de e étant une fois connues, on peut les substituer dans l'équation

$$e=\frac{2p(2a)^3}{4\,.\,b\,.\,c^3\,.\,f},$$

et déterminer ainsi l'une des cinq quantités qu'elle contient, lorsque les quatre autres sont connues, ce qui donne naissance à divers problèmes qui trouvent de fréquentes applications.

Ténacité et résistance à la rupture. — La ténacité des corps est la résistance qu'ils opposent à la rupture lorsqu'ils sont tirés dans le sens de leur longueur. Soit s le nombre des millimètres carrés de la section perpendiculaire à l'axe d'un fil, d'une tige, ou en général d'un corps prismatique; soit k le nombre des kilogrammes nécessaires pour produire la rupture par la traction. En admettant que l'effort se partage également entre tous les millimètres carrés de la section s, il est évident que $\frac{k}{s}$ sera l'effort supporté par 1 millimètre carré; c'est en général cette expression que l'on prend pour la mesure de la ténacité. Ainsi une substance aura une ténacité double d'une autre quand la valeur de $\frac{k}{s}$ sera pour la première double de ce qu'elle est pour la seconde.

La résistance à la rupture peut s'observer aussi par les deux procédés qui servent à déterminer le coefficient d'élasticité; mais le procédé direct, celui de la traction dans le sens de la longueur, ne peut guère s'appliquer que pour les fils, ou pour des tiges de petites dimensions, tandis que la méthode des deux appuis et de la charge au milieu s'applique aux pièces des plus grandes dimensions. Dans ce cas, il faut observer la flèche de rupture, c'est-à-dire celle qui a lieu au moment où la pièce se rompt. Alors le coefficient de rupture r est donné par la relation

$$r = \frac{2p \,.\, 3a\left(1 + 3 \,.\, \frac{f^2}{a^2}\right)}{bc^2},$$

f étant la flèche de rupture, et $2p$, $2a$, b et c représentant les mêmes choses que dans les valeurs précédentes de e.

En négligeant le terme $\frac{f^2}{a^2}$ qui est en général très-petit, cette équation devient

$$r = \frac{2p \,.\, 3a}{bc^2},$$

et tout se réduit alors à observer la charge $2p$ qui détermine la rupture. Dans ces formules, le mètre étant l'unité de longueur, les valeurs de r représentent les nombres de kilogrammes qui correspondent à une section de 1 mètre carré; en les divisant par 1 000 000, elles donnent ce que l'on appelle en général la

Digitized by Google

ténacité, c'est-à-dire la charge par millimètre carré qui détermine la rupture.

Le tableau suivant contient le résultat des expériences qui ont été faites sur ce sujet.

Ténacité ou charge de rupture pour 1 millimètre carré.

Fil de fer	60 kilogr.	Buffon.
	64.	Telfort.
	40 à 90.	Seguin.
	50 à 84.	Dufour.
Fer en barres	44,5.	Poleni.
	43.	Perronet.
	47.	Soufflot et Rondelet.
	30 à 50.	Minard et Desormes.
	46.	Telfort.
	40.	Brown.
	30 à 60.	Seguin.
	30 à 40.	Émile Martin.
Tôle de fer	36 à 41.	Navier.
Acier en barres	30 à 40.	»
Fonte de fer	7 à 14.	Minard et Desormes.
	14,2.	Brown.
	13 à 14.	Rennie.
Cuivre rouge	45 à 70.	Minard et Desormes.
Id. recuit	21 à 25.	*Id.*
Id. battu	25.	Rennie.
Id. fondu	13.	*Id.*
Id. laminé	21.	Navier.
Laiton en fil	40 à 70.	Dufour.
Id. fondu	13.	Rennie.
Métal à canon	18 à 23.	Minard et Desormes.
Id.	25.	Rennie.
Étain fondu	3.	Rennie.
Id.	2.	Minard et Desormes.
Plomb	1,3.	Minard, Rennie, Navier.
Verre	2,5.	Navier.
Bois de chêne	9,8.	Rondelet.
Id.	6,5.	Minard et Clément.
Cordages	5 à 6.	Noirfontaine.

Je dois faire remarquer que tous ces nombres ont été obtenus par la méthode directe; que les expériences faites sur les bois, par la méthode des appuis, par Buffon, Barlow et Tredgold,

Digitized by Google

donnent aussi une ténacité moyenne de 6 à 9 kilogr., conforme à celle du tableau; mais que celles qui ont été faites sur la fonte par Banks, Gauthey, Rondelet, Rennie et Tredgold, s'écartent considérablement de ce qu'on obtient par la méthode directe; elles donnent des ténacités doubles et presque triples; ainsi Gauthey trouve 28^k et Rennie 38^k.

De la résistance des vases. — Pour prendre une idée de l'effet que produisent les liquides sur les parois des vases, concevons un anneau, ou plutôt un fil flexible, dont tous les points soient pressés de dedans en dehors par des forces égales. S'il est élastique, il est évident que ces forces normales font effort pour le tendre d'abord et ensuite pour le rompre; ainsi elles se transforment en forces tangentielles, qui agissent en sens contraire, et qui opèrent sur lui comme des forces de traction qui s'exerceraient dans le sens de la longueur. On démontre en mécanique comment s'accomplit cette transformation des forces normales en forces tangentes, et l'on arrive à cette conséquence que l'effort f qui s'exerce suivant les tangentes est égal à la pression normale multipliée par le rayon de l'anneau, c'est-à-dire $f=pr$.

Concevons maintenant un tube cylindrique rempli de liquide. Soient e son épaisseur en millimètres, et r son rayon. Imaginons deux plans perpendiculaires à l'axe, à 1 millimètre de distance, isolant ainsi un anneau d'un millimètre de hauteur; la pression sur chaque millimètre carré étant p, l'effort tangentiel f sera pr. Mais la résistance de l'anneau à cet effort sera égale à te, c'est-à-dire à sa ténacité multipliée par sa section; il sera donc à sa limite de résistance quand on aura

$$pr = te, \quad \text{ou} \quad p = \frac{te}{r}.$$

Telle est la pression maximum qu'il puisse supporter.

On voit comment, trois de ces quantités étant données, on peut trouver la quatrième.

Supposons, par exemple, une chaudière à vapeur cylindrique de tôle de fer, d'un mètre de diamètre, et destinée à supporter 10 atmosphères: quelle épaisseur faudrait-il lui donner? $p=0^k,1$; $t=36^k$; $r=500^{mm}$, par conséquent $e=\frac{51}{36}=1^{mm},41$. Mais l'on comprend qu'il n'y aurait aucune sûreté si l'on ne prenait pas une épaisseur sept ou huit fois plus grande.

Dans les tuyaux fermés par les deux bouts, les pressions que supportent les bases terminales produisent une traction sur la lon-

gueur; cet effort parallèle à l'axe est seulement $\frac{pr}{2}$, ou la moitié de l'effort perpendiculaire que nous venons de considérer.

21. De l'élasticité de torsion. — La facilité avec laquelle les fils fins de métal peuvent être tordus, et la régularité parfaite avec laquelle ils reviennent sur eux-mêmes pour reprendre leur position primitive, ont conduit les physiciens à plusieurs découvertes importantes.

C'est Coulomb qui a le premier observé cette propriété avec l'attention qu'elle mérite, et c'est lui aussi qui en a fait le premier les applications les plus heureuses, en déterminant, dans sa balance de torsion, les lois fondamentales des fluides électriques et magnétiques. Quelques années plus tard, Cavendish parvint de son côté à un résultat plus extraordinaire encore, puisqu'il détermina la densité de la terre, et, par suite, son poids total au moyen de la torsion d'un petit fil d'argent de quelques décimètres de longueur et de quelques centièmes de millimètre de diamètre (t. I, n° 54).

Les lois générales de l'élasticité de torsion peuvent être démontrées par l'expérience; on se sert pour cela de différents appareils qui reposent sur le même principe, mais qui sont proportionnés aux dimensions et à la force du fil. L'appareil de la figure 27 convient aux fils capables de porter 100 ou 200 kilogrammes. On adapte alors à la traverse une forte pince de fer qui fixe l'extrémité supérieure du fil, tandis que son extrémité inférieure passe dans un anneau dont le sommet est bien centré par rapport à l'axe du poids de fonte ou de plomb *b*, qui a la forme d'un large cylindre bien homogène dans toute sa masse.

Au moyen de cet appareil on démontre les lois suivantes :

1° *En chargeant un fil de différents poids, il s'arrête en général dans des positions de stabilité différentes.* Quelquefois cette variation peut s'étendre jusqu'à une demi-circonférence, ou même jusqu'à une circonférence entière. Un assemblage de plusieurs fils présente le même phénomène; ainsi, quand on suspend, par exemple, une aiguille aimantée à un faisceau de soie plate, il importe de trouver d'avance la position d'équilibre de ce fil composé en y suspendant un poids égal à celui de l'aiguillle aimantée qu'il doit porter. Un poids plus fort ou plus faible lui donnerait un torsion qui pourrait probablement exercer une influence sensible sur l'amplitude des variations diurnes.

Digitized by Google

2° *Les oscillations du fil sont isochrones*, c'est-à-dire qu'elles s'accomplissent toutes dans le même temps, quelle que soit leur amplitude, pourvu toutefois que cette amplitude ne dépasse pas une certaine limite qui dépend de la nature et de la longueur du fil; mais cette limite va souvent à une demi-circonférence ou même à une circonférence entière. Dans tout ce qui va suivre, nous ne parlerons que des oscillations *très-petites*, c'est-à-dire *isochrones*.

Pour vérifier par l'expérience cette loi de l'isochronisme, on attache le fil à la pince supérieure, on le charge d'un poids assez fort pour le *tendre* et trop faible pour l'*étirer*, et quand l'équilibre est bien établi, on tourne le cylindre de 50, de 100 ou même de 180°, avec la précaution de le maintenir dans son axe, qui est aussi l'axe du fil; ensuite on l'abandonne à lui-même; les oscillations commencent; on les compte à partir d'un instant donné, au moyen d'un repère ou d'un index qui est adapté au cylindre, et l'on mesure le temps avec une bonne montre à secondes.

On démontre par les principes de la mécanique que, les oscillations étant isochrones, il faut nécessairement que la *force de torsion qui les produit soit proportionnelle à l'angle de torsion*.

3° *Les durées des oscillations sont entre elles comme les racines carrées des poids qui tendent les fils.* Cette vérité ne peut être constatée avec une grande exactitude que sur les fils qui ont en même temps assez de souplesse pour être tendus par un poids très-faible, et assez de ténacité pour supporter un poids considérable sans être *étirés*. Car on peut alors, entre ces deux limites, prendre des poids cylindriques de même diamètre qui soient entre eux, par exemple, comme 1, 4, 9, 16, 25, et reconnaître, par des oscillations analogues aux précédentes, que les durées des oscillations sont entre elles comme les nombres 1, 2, 3, 4, 5, etc.

On démontre par les principes de mécanique que cette troisième loi ne peut subsister qu'autant *que la force de torsion d'un fil reste exactement la même sous les différents poids qui le tendent.*

4° *Les durées des oscillations sont entre elles comme les racines carrées des longueurs du fil.* C'est-à-dire que, si l'on prend diverses longueurs d'un même fil, qui soient entre elles comme les nombres 1, 4, 9, 16, 25, etc., et qu'on les fasse osciller après les avoir chargées du même poids, les durées des

Digitized by Google

oscillations seront entre elles comme les nombres 1, 2, 3, 4, 5, etc.

Puisque la durée des oscillations augmente avec la longueur du fil, il est évident que la force de torsion diminue; et l'on démontre théoriquement qu'elle diminue comme la longueur du fil augmente, car cette hypothèse est la seule qui reproduise la loi expérimentale précédente.

Au reste, on peut se rendre compte de cette vérité théorique en observant que pour un même angle de torsion l'écartement des molécules est réduit à la moitié quand la longueur du fil est double, au tiers quand elle est triple, etc., et qu'il est tout simple que la force de torsion soit alors réduite à la moitié, au tiers, etc., puisque cela prouve qu'elle est proportionnelle à l'écartement des molécules, comme on pourrait le supposer *a priori*.

5° *Les durées des oscillations sont en raison inverse des carrés des diamètres des fils*. C'est-à-dire, que si l'on prend successivement des fils de *même substance* et de *même longueur*, dont les diamètres soient entre eux comme les nombres 1, 2, 3, 4, et qu'on les fasse osciller après les avoir chargés des *mêmes poids*, les durées des oscillations seront entre elles en raison inverse des nombres 1, 4, 9, 16, etc.

On en conclut par la théorie que les forces de torsion sont entre elles comme les quatrièmes puissances des diamètres des fils, car les forces de torsion sont en raison inverse des carrés des temps d'une oscillation.

22. Après avoir rapporté les lois expérimentales de la torsion et les avoir rapprochées des lois théoriques auxquelles elles se trouvent nécessairement liées, il est bon de donner ici la formule générale qui comprend tous ces résultats. Cette formule est la suivante :

$$t^2 = \frac{\pi^2 p r^2}{2gf}.$$

$\pi = 3,1415926$.

g, gravité, à Paris, ou $9^{m},8088$.

t, durée d'une oscillation évaluée en secondes.

p, poids cylindrique qui tend le fil.

r, rayon, en mètres, du cylindre dont le poids est p.

f, force de torsion du fil, c'est-à-dire l'effort qu'il faudrait exercer à l'extrémité d'un levier d'un mètre de longueur pour le maintenir tordu d'un arc dont la valeur rectiligne serait aussi

un mètre en le comptant sur une circonférence d'un mètre de rayon. Ainsi la force de torsion est exprimée par un poids, et elle est évaluée en grammes ou en kilogrammes, suivant que l'on a évalué le poids p au moyen de l'une ou de l'autre de ces unités.

Cette formule peut servir à calculer la valeur absolue de la force de torsion, et à mettre en évidence les différents rapports qui existent entre cette force et la durée des oscillations, leur amplitude, le poids cylindrique qui tord le fil et son rayon; il est facile d'en faire des applications.

On peut aussi de ces expériences d'oscillations, telles que Coulomb les a exécutées autrefois, même sur des fils très-fins de fer, de laiton ou d'argent, déduire le coefficient d'élasticité; il suffit pour cela de combiner la formule précédente avec la formule

$$e = \frac{16 f . l}{3\pi a^4},$$

à laquelle M. Wertheim a été conduit, pour exprimer le coefficient d'élasticité e au moyen de la force de torsion f, de la longueur l du fil oscillant et de son rayon a; le mètre étant toujours l'unité de longueur. L'élimination de f donne en effet :

$$e = \frac{8\pi}{3g} . \frac{pr^2}{t^2} . \frac{l}{a^4}.$$

Des expériences récentes de M. Kupffer, sur les oscillations tournantes de très-longs fils de platine, d'argent et d'or, donnent ainsi les coefficients d'élasticité suivants :

	kilogr.
Platine.	17 000 000 000
Argent.	7 500 000 000
Or.	7 200 000 000

coefficients qui diffèrent très-peu de ceux que l'on obtient par la mesure directe des allongements des mêmes fils. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXI, ann. 1851.)

Digitized by Google

LIVRE CINQUIÈME.

ACOUSTIQUE.

23. L'acoustique a pour objet de déterminer les lois suivant lesquelles le son se produit dans les corps et se transmet ensuite jusqu'à nos organes. Cette science est du ressort de la physique, parce que les corps, tandis qu'ils retentissent, et qu'ils produisent du bruit ou du son, éprouvent dans leur masse des modifications remarquables, tout à fait dépendantes des forces physiques qui les constituent. Nous verrons qu'ils sont alors ébranlés dans toutes leurs parties, et que les molécules qui les composent exécutent des oscillations ou des mouvements de vibration si rapides, qu'il est impossible d'en compter le nombre par des observations directes. L'étendue et la durée de ces mouvements, la direction suivant laquelle ils se propagent, et l'harmonie qui doit exister entre eux, pour qu'ils se soutiennent et se perpétuent sans se détruire sont les phénomènes les plus frappants qui se présentent aux physiciens pour étudier l'arrangement moléculaire des corps, leur élasticité et toutes les circonstances de leur structure intérieure.

Pour prendre une première idée du nombre et de la variété des phénomènes que l'acoustique embrasse, il suffit de remarquer que tous les sons que nous pouvons entendre, que toutes les nuances que notre organe peut saisir entre eux, correspondent certainement à des modifications physiques différentes dans l'air qui nous apporte ces impressions, et dans le corps sonore, plus ou moins éloigné, duquel l'air les a reçues. C'est la série de ces mouvements divers, communiqués de proche en proche depuis le corps sonore jusqu'à nous, qu'il s'agit de développer. Ainsi l'acoustique prend le son à sa naissance ; elle constate, pour ainsi dire, le mouvement de toutes les molécules du corps qui le produit ; elle montre comment il se communique à l'air, comment il en traverse les masses, et comment il vient enfin ébranler les membranes extérieures de notre organe ; là, la science est à son terme ; dès que le nerf acoustique est frappé, il n'y a plus de

Digitized by Google

traces perceptibles de modifications matérielles, et, par conséquent, plus de phénomènes physiques.

Ces notions générales font assez voir en quoi l'acoustique diffère de la musique : la première de ces sciences considère le son hors de nous et des sensations qu'il peut produire; la seconde le considère en nous, dans les émotions qu'il peut faire naître, dans les sentiments ou dans les passions qu'il peut exciter ou modifier.

Digitized by Google

CHAPITRE PREMIER.

De la Production du Son et de sa transmission dans l'air atmosphérique.

24. **Le son est un mouvement particulier excité dans la matière pondérable.** — Si l'on écoute un son et qu'en même temps on observe la cause qui le produit, on voit que la cause a cessé d'agir avant que le son soit parvenu jusqu'à notre organe : ainsi, dans l'explosion d'une arme à feu, on aperçoit de loin la lumière avant d'entendre le coup; à dix ou douze mètres de distance, la lumière et le coup semblent frapper en même temps l'œil et l'oreille; mais à mesure que la distance augmente, le temps qui s'écoule entre l'apparition de la lumière et la perception du bruit devient de plus en plus sensible. Il en est de même de l'explosion de la foudre : l'éclair brille avant que le coup de tonnerre se fasse entendre, et le temps qui s'écoule entre ces deux phénomènes peut donner une mesure de la hauteur ou plutôt de la distance à laquelle la foudre éclate. D'après cela, on peut juger que plusieurs observateurs, placés sur une même ligne à cent pas les uns des autres, n'entendraient pas au même instant le bruit qui serait excité à l'une des extrémités de cette ligne, aux pieds du premier observateur : celui-ci entendrait le son avant tous les autres, le deuxième l'entendrait avant le troisième, le troisième avant le quatrième, etc.; et ce qu'il importe de remarquer aussi, c'est qu'au moment où le troisième observateur, par exemple, entendrait le son, le premier et le deuxième ne l'entendraient *plus*, tandis que le quatrième et les suivants ne l'entendraient *pas encore;* on peut donc conclure de cette expérience qu'un son brusque et instantané, comme celui qui résulte d'un choc ou d'une explosion, *passe* successivement d'un lieu à l'autre, et qu'en conséquence il est un mouvement particulier dont notre organe est affecté.

Mais, dans quelle substance ce mouvement peut-il se propager avec tant de rapidité? Est-ce dans l'air lui-même ou dans quelque autre fluide? Cette question, fort difficile en appa-

Digitized by Google

rence, peut être résolue d'une manière décisive par l'expérience suivante :

Au milieu de la platine de la machine pneumatique, on dispose un petit coussinet de laine ou de coton, sur lequel on place un mouvement d'horlogerie à détente, muni d'un timbre ; cet appareil étant couvert d'une cloche à tige et à boîte à cuir, on fait le vide, puis on tourne la tige pour presser la détente et lâcher le ressort. A l'instant l'horloge marche, le marteau frappe le timbre par intervalle, et aucun bruit ne se fait entendre au dehors. Mais si l'on rend un peu d'air, on commence à distinguer un petit bruit, correspondant à chaque coup de marteau ; un peu plus d'air donne à ce bruit un peu plus de force ; enfin, quand l'air est tout à fait rentré, le son est fort et se fait entendre au loin. Donc le son ne peut pas se propager dans le vide : là où il n'y a plus de matière pondérable, il n'y a plus de véhicule du son.

Ainsi le son diminue d'intensité, par une double cause, à mesure qu'il s'élève dans l'atmosphère : il diminue parce que la distance augmente, et parce que l'air dans lequel il pénètre est de plus en plus raréfié. Les bruits les plus violents qui retentissent sur la terre ne peuvent pas sortir des limites de l'atmosphère ; ils s'affaiblissent à mesure qu'ils en approchent, et s'éteignent sans pouvoir les franchir. Réciproquement, nul bruit ne peut venir des espaces célestes jusqu'à la terre ; les plus terribles explosions pourraient éclater sur le globe de la lune, sans qu'il nous soit donné d'en entendre le moindre retentissement.

De Saussure dit qu'au sommet du mont Blanc un coup de pistolet fait moins de bruit qu'un petit pétard tiré dans la plaine, et Gay-Lussac a constaté que l'intensité de sa voix était très-affaiblie lorsqu'il essayait de former des sons à 7000 mètres de hauteur, suspendu dans son ballon au milieu d'un air très-raréfié.

L'air n'est pas le seul corps qui puisse transmettre les sons, tous les fluides élastiques jouissent de cette propriété ; pour s'en assurer, on suspend au centre d'un grand ballon (Pl. 29, Fig. 1) une petite sonnette avec des fils de chanvre non tordus ; on y fait le vide, et la sonnette ne peut plus se faire entendre ; mais si l'on fait passer dans ce ballon quelques gouttes d'un liquide volatil, tel que l'éther, la vapeur se forme à l'instant et le bruit devient très-sensible.

Digitized by Google

L'eau transmet très-bien le son; les plongeurs peuvent entendre ce que l'on dit sur le rivage, et du rivage on entend le bruit des cailloux qui sont heurtés sous l'eau à de grandes profondeurs.

Enfin, les corps solides peuvent non-seulement produire le son, mais ils peuvent aussi le transmettre : quand le timbre est sous la cloche, il faut bien que le son traverse toute l'épaisseur des parois pour se faire entendre au dehors. Un grand nombre d'expériences analogues démontrent cette vérité; il suffit d'en citer une seule. Si un observateur approche l'oreille de l'une des extrémités d'une poutre de sapin de 20 à 25 mètres de longueur, il entend le bruit que l'on fait à l'autre extrémité en frappant légèrement le bout des fibres, et cependant ce bruit est si faible dans l'air qu'il échappe à celui qui le produit.

Après avoir montré que le son est un mouvement, qu'il est produit dans la matière pondérable, et qu'il peut se propager dans tous les corps, il faut essayer de reconnaître quelle est la nature de ce mouvement.

25. Le mouvement qui produit le son est toujours un mouvement de vibration. — La plupart des corps sonores accomplissent des oscillations sensibles pendant le temps qu'ils rendent des sons. Ce phénomène est surtout frappant dans les cordes de violon, de harpe, de guitare et des autres instruments de cette espèce; les oscillations, il est vrai, sont trop rapides pour que l'on puisse les compter; mais l'œil les aperçoit, il saisit les limites des excursions de la corde, et il croit la voir en même temps, dans toutes les positions intermédiaires, à peu près comme il voit un cercle de feu lorsqu'un charbon enflammé est tourné en rond avec une vitesse suffisante. Ces *oscillations* ou ces mouvements de *va*-et-*vient* constituent ce qu'on appelle en acoustique des *vibrations*.

Dans les timbres ou les cloches, il y a des vibrations analogues; pour s'en assurer, on frappe une grande cloche de verre pour lui faire rendre un son, et ensuite on l'incline pour qu'une balle vienne en toucher la paroi; alors la balle saute d'un mouvement rapide, et l'on entend les chocs répétés qu'elle produit, en retombant, par son poids.

Enfin, il suffit de poser le doigt légèrement sur un corps sonore quelconque, pour sentir un frémissement qui accompagne

Digitized by Google

toujours la production du son ; mais si l'on exerce une pression un peu forte, le mouvement est arrêté dans toute la masse et le son est éteint.

Il y a des instruments, tels que la flûte et le sifflet, qui semblent faire exception au principe général que nous avons énoncé, car rien dans ces corps sonores ne paraît être en vibration ; mais nous verrons bientôt que, si la matière solide de ces instruments ne vibre pas ou ne vibre que d'une manière insensible, il y a cependant une matière vibrante, et cette matière est la masse d'air qu'ils contiennent. Ainsi, le principe est vrai dans toute sa généralité, et nous allons montrer que l'air qui transmet le son vibre comme le corps sonore lui-même.

26. Chaque vibration du corps sonore excite dans l'air une ondulation d'une longueur déterminée. — Cette proposition est une des plus importantes et des plus difficiles de l'acoustique; mais nous devons l'aborder dès à présent, et mettre d'autant plus de soin à la faire comprendre, qu'elle nous servira comme de point de départ pour exposer les théories de l'optique.

Concevons un tube horizontal *tt'* (Pl. 29, Fig. 2) ayant, par exemple, 10 000 décimètres de longueur et 1 décimètre de diamètre ; l'air qui le remplit est partout à la même température et sous la même pression ; un piston *p*, joignant bien contre les parois, peut, en 1″ de temps, accomplir une oscillation entre les deux positions *p* et *s* qui sont à 1 décimètre de distance.

Tout étant en repos, le piston part pour arriver en *s* ; pendant ce mouvement, l'air du tuyau se *modifie* d'une certaine manière, et, pour mieux étudier les modifications qu'il éprouve, nous saisissons l'instant précis où le piston arrive en *s* et nous supposons que toutes les molécules d'air *restent* comme elles se trouvent alors, ou, pour mieux dire, nous supposons que celles qui sont comprimées ne puissent pas se débander, que celles qui sont dilatées ne puissent pas se rapprocher, et que celles qui sont en repos conservent leur état de repos.

Si la colonne d'air se comportait comme un corps solide parfaitement dur, il est clair que, l'une de ses extrémités étant poussée par le piston, l'autre extrémité sortirait du tuyau au même instant et de la même quantité; mais il n'y a point de corps parfaitement dur ; l'air est très-fluide et très-compressible, et quand le piston pousse devant lui l'une des extrémités de la colonne, l'autre extrémité ne peut pas obéir au même

instant; il faut du temps pour que l'impression se transmette jusqu'à elle; et, d'après la longueur que nous avons donnée au tuyau, nous pouvons bien affirmer qu'aucune molécule d'air n'est sortie par l'extrémité ouverte *t* pendant que le piston est passé de *p* en *s*. Donc, l'air est *comprimé* dans le tuyau à droite du piston, puisqu'il occupe un décimètre de longueur de moins qu'il n'occupait tout à l'heure. De plus, il est évident qu'il n'est pas comprimé *également* dans toute l'étendue du tuyau; car, pendant la durée de 1″ que le piston a dû mettre pour venir de *p* en *s*, la compression n'a pu se communiquer et se faire sentir qu'à une certaine distance, telle que *a*, par exemple. Cette partie *as* de la colonne d'air, qui a pu être *modifiée* pendant le mouvement du piston, est ce que l'on appelle *une onde* ou *une ondulation*, et la *longueur de l'onde* est la distance de ses deux extrémités *s* et *a*.

Examinons maintenant comment l'air est modifié dans les différentes parties de l'onde; et, pour cela, concevons des plans parallèles au piston, qui partagent la colonne d'air en petites tranches de la même épaisseur. Pour savoir ce qui est arrivé à toute la masse d'air qui compose l'onde, il suffit de connaître ce qui est arrivé à une molécule de chaque tranche. Or, puisque l'air qui était compris entre *p* et *a* a été comprimé dans sa totalité et réduit à n'occuper que l'espace *sa*, il faut bien que dans chaque tranche les molécules aient éprouvé deux effets : 1° qu'elles aient été comprimées; 2° qu'elles aient reçu une certaine vitesse *impulsive*, c'est-à-dire une vitesse qui les éloigne du centre d'ébranlement ou du piston qui les a poussées.

Il est évident que, dans toute la longueur de l'onde, les différentes tranches ne peuvent être au même état : la dernière tranche, par exemple, celle qui est en *a*, n'a pu recevoir qu'une très-petite vitesse et une compression très-petite, puisque le mouvement ne fait que d'y arriver; la première tranche, celle qui est en *s*, est déjà revenue au repos, puisque nous considérons les phénomènes à l'instant où le piston s'arrête; et comme elle n'a plus de vitesse, elle n'a pareillement plus de compression; elle a déjà communiqué tout ce qu'elle avait. Au contraire, les tranches qui sont vers le milieu de l'onde ont en même temps la plus forte compression et la plus grande vitesse. Il y a donc un certain ordre dans les diverses modifications des différentes tranches, tant pour la vitesse des molécules d'air que

Digitized by Google

pour leur compression. Cet ordre dépend de l'ordre des vitesses croissantes et décroissantes par lesquelles le piston a dû passer en se transportant de p en s.

On peut représenter, par une figure qui parle aux yeux, tous les mouvements qui caractérisent une onde depuis son origine jusqu'à sa fin : pour cela, il suffit d'élever sur la ligne sa, qui en marque la longueur, des perpendiculaires dont les hauteurs représentent le degré de compression des tranches correspondantes; les extrémités de ces perpendiculaires formeront une ligne dont la courbure ou les sinuosités représenteront fidèlement l'ordre dans lequel se succèdent les compressions des tranches successives. En s la hauteur de la perpendiculaire sera nulle, puisque la compression est nulle; il en sera de même en a; en x la hauteur de la perpendiculaire sera, par exemple, xx', en y elle sera yy', etc.; en sorte que la courbe des compressions $sy'a$ pourrait être une demi-circonférence de cercle. Mais on conçoit que, sur cette longueur sa, on peut tracer une foule de courbes continues passant par les points s et a, comme on le voit dans la figure 3, et même, l'une de ces courbes étant donnée, on peut toujours attribuer au piston, dans son passage de p en s, un mouvement tel qu'il excite une onde dont les compressions successives soient représentées par cette courbe. Quand il y a plusieurs sinuosités dans la courbe des compressions, comme on le voit dans la figure 4, on dit que l'onde correspondante est une *onde dentelée*.

Après avoir fait l'analyse des diverses modifications que le piston peut imprimer à la colonne d'air en passant de p en s dans l'intervalle de 1″, essayons de voir ce qui arrivera dans les instants suivants, le piston restant toujours arrêté en s. L'air momentanément comprimé de s en a ne peut pas rester dans cet état; car, le tuyau étant ouvert en t, il faut qu'après un certain temps l'air excédant soit sorti, et que toute la colonne soit revenue au repos. Or, on démontre, en mécanique, que la compression et la vitesse se communiquent de proche en proche de la manière suivante : dans le premier instant de la deuxième *seconde*, la vitesse passe à droite de a, envahit une première tranche, et en même temps la tranche qui touche le piston tombe au repos; dans le deuxième instant, une deuxième tranche à droite de a est envahie, et une deuxième tranche en avant du piston tombe au repos; dans le troisième instant, le mouvement gagne

la troisième tranche en avant de a, et le repos gagne la troisième tranche en avant du piston, etc., etc.; de telle sorte qu'à la fin de la deuxième *seconde* l'air est en repos de s en a, et il est agité de a en b; la longueur ab est égale à sa, et, de plus, les compressions et les vitesses depuis a jusqu'en b sont exactement ce qu'elles étaient de s en a. Ainsi, l'ondulation s'avance et se transporte, en quelque sorte, tout d'une pièce en conservant sa longueur et tous ses caractères; à la fin de la troisième *seconde*, elle serait en bc; à la fin de la quatrième en cd, etc.

L'onde dans laquelle toutes les tranches sont *comprimées*, et toutes les vitesses *impulsives*, s'appelle *onde condensée* ou quelquefois *onde condensante*.

Mais il est facile de voir que des phénomènes inverses se sont développés à gauche du piston p pendant qu'il s'est transporté en s. En effet, un espace plus grand a été offert à la colonne d'air, la première tranche s'est précipitée à la suite du piston *en se raréfiant*, la deuxième tranche s'est précipitée pour suivre la première et prendre sa place, etc., etc.; et après la première *seconde*, quand le piston s'arrête en s, la raréfaction s'est fait sentir jusqu'en a'. L'onde qui en résulte s'appelle *onde raréfiée*, ou bien *onde raréfiante;* sa longueur est exactement la même que celle de l'onde condensée qui se produit devant le piston; les raréfactions sont nulles en s et en a', et, dans toutes les tranches, les vitesses sont *apulsives*, c'est-à-dire dirigées vers le centre de l'ébranlement. Cette onde raréfiée se propage aussi, de proche en proche, dans toute l'étendue de la colonne d'air, en conservant partout la même longueur et la même succession de vitesses et de raréfactions.

Ces considérations nous laissent entrevoir, dès à présent, les principes sur lesquels repose le phénomène de l'audition; car, si nous imaginons dans quelque point du tuyau une tranche quelconque h (Fig. 2), nous pouvons remarquer qu'elle éprouve successivement toutes les modifications qui constituent l'onde sa, puisqu'elle devient tour à tour, la première, la deuxième, la troisième,..., et la dernière tranche de cette onde. Et si dans cette tranche nous imaginons une petite membrane très-délicate et très-élastique, il est évident qu'elle devra recevoir dans leur ordre toutes les impulsions qui sont successivement données aux molécules d'air; or, c'est là précisément ce qui arrive à la *membrane du tympan* qui termine le conduit dont le pavillon de

Digitized by Google

l'oreille est l'épanouissement. On conçoit donc que cette membrane, dont la mobilité égale celle de l'air, puisse recevoir et compter en quelque sorte toutes les modifications des différentes tranches de l'onde sonore.

Si le piston, après s'être arrêté en *s* pendant un instant imperceptible, revient dans sa position primitive *p* en repassant par les mêmes vitesses, on voit qu'il excitera derrière lui, à droite de *s*, une onde raréfiée toute pareille à celle qu'il avait excitée à gauche pendant *son allée*, et que cette onde se mettra à la suite de la première onde condensée, de telle sorte qu'à la fin de la deuxième *seconde*, l'onde condensée sera entre *a* et *b*, et l'onde raréfiée entre *a* et *s*. De l'autre côté, au contraire, l'onde raréfiée sera de *a'* en *b'* et l'onde condensée de *a'* en *s*, puis une autre *allée* et une autre *venue* du piston exciteront encore des ondes semblables et semblablement disposées, qui *courront* après les premières, et ainsi de suite. Alors une oreille qui serait placée quelque part dans le tuyau n'entendrait plus un son passager comme le bruit d'une explosion, mais un *son continu* plus ou moins grave, plus ou moins fort et d'un timbre plus ou moins agréable.

27. De la gravité et de l'acuité des sons. — La différence qui existe entre les sons graves et les sons aigus est si frappante pour nos organes, qu'elle doit certainement correspondre à quelque modification physique bien caractérisée dans l'air qui porte ces sons. Nous démontrerons plus tard, par des observations directes, que le son le plus grave du jeu d'orgue a une longueur d'onde de 32 pieds, et que le son musical le plus aigu n'a qu'une longueur de 18 lignes environ; encore ces deux limites ne comprennent pas tous les sons et toutes les nuances que l'oreille humaine puisse distinguer; nous verrons aussi que deux ondes de même longueur donnent toujours l'*unisson* parfait, quelle que soit d'ailleurs l'intensité ou le timbre des sons qu'elles portent. Le rapport de gravité et d'acuité de deux sons est ce qu'on appelle le *ton*.

28. L'*intensité* du son ne peut pas dépendre de la longueur des ondes, elle dépend seulement des compressions plus ou moins fortes et des vitesses plus ou moins grandes que l'air a reçues du corps sonore et qui se transmettent de couche en couche jusqu'à notre organe. Une corde de basse peut être à l'unisson avec le bruit déchirant du clairon, c'est-à-dire que les

ondes sont de même longueur; mais l'air ébranlé dans le clairon accomplit des vibrations dont l'amplitude est beaucoup plus grande; c'est là ce qui fait son intensité assourdissante.

29. Le *timbre* des sons est bien plus difficile à caractériser que le ton et l'intensité; les physiciens ne sont pas complétement d'accord sur ce point; mais il paraît bien probable que le timbre dépend de l'ordre dans lequel se succèdent les vitesses et les changements de densité dans les différentes tranches d'air qui sont comprises entre les deux extrémités de l'onde, et qu'il dépend aussi de ce que les portions condensées et raréfiées de l'onde peuvent être dissymétriques dans une foule de circonstances (Fig. 5).

30. Tous les sons, quel que soit leur ton, leur timbre ou leur intensité, se propagent dans l'air avec la même vitesse.—Lorsque plusieurs observateurs écoutent un concert à diverses distances, ils entendent tous la même mesure et la même harmonie. Ainsi, en se propageant au loin, tous les sons se succèdent dans le même ordre et aux mêmes intervalles; ce qui suppose nécessairement qu'ils marchent avec la même vitesse; car, si les sons graves, par exemple, prenaient l'avance sur les sons aigus, la mesure serait bientôt rompue, et ce qui serait une harmonie à 10 pas serait à 100 pas une insupportable cacophonie.

31. La vitesse du son dans l'air est de 340 mètres par seconde, à 16°.—On a fait de nombreuses expériences en différents lieux de la terre, pour déterminer avec exactitude la vitesse du son. Nous nous bornerons à exposer seulement celles qui ont été faites près de Paris, en 1822, par le Bureau des Longitudes.

Les deux stations que l'on avait choisies étaient Villejuif et Montlhéry. A Villejuif, le capitaine Boscary fit disposer, sur un point élevé, une pièce de six avec des gargousses de deux et de trois livres de poudre. Les observateurs placés autour de la pièce étaient MM. de Prony, Arago et Mathieu. A Montlhéry, le capitaine Pernetty fit disposer une pièce de même calibre, avec des gargousses de même poids; les observateurs étaient MM. de Humboldt, Gay-Lussac et Bouvard. Les expériences furent faites de nuit et commencèrent à onze heures du soir, le 21 et le 22 juin 1822. De Villejuif, on apercevait le feu de l'explosion de Montlhéry, et *vice versâ;* le ciel était serein et l'air à peu près calme.

Les chronomètres étant bien réglés, il avait été convenu

Digitized by Google

que chaque station tirerait 12 coups à 10′ les uns des autres, et que la station de Montlhéry commencerait 5′ avant celle de Villejuif; de telle sorte qu'un observateur qui aurait été placé juste au milieu de la ligne des deux canons, aurait entendu de 5′ en 5′ des *coups croisés* ou *réciproques*, le premier venant de Montlhéry, le deuxième de Villejuif, le troisième de Montlhéry, etc. Ces coups réciproques étaient le seul moyen de découvrir si le son emploie le même temps pour parcourir le même espace dans les deux directions opposées.

Les observateurs de Villejuif entendirent parfaitement tous les coups de Montlhéry; chacun d'eux notait sur son chronomètre le temps qui s'écoulait entre l'apparition de la lumière et l'arrivée du son; la plus grande différence que l'on trouve entre les trois résultats correspondant à une observation ne s'élève pas à plus de 0″,4, et entre les douze observations la différence des moyennes ne dépasse pas 0″,3; le temps le plus long est 55″, le plus court 54″,7, moyenne 54″,84.

A Montlhéry, on ne put entendre que sept des douze coups tirés à Villejuif. Cependant les résultats sont assez concordants : le temps le plus long est 54″,9, le plus court 53″,9, et le temps moyen de 54″,43.

Ainsi, on peut prendre 54″,6 pour le temps moyen que le son mettait à passer d'une station à l'autre.

Restait à mesurer exactement l'intervalle des deux stations; M. Arago fut chargé de ce soin, et, en s'appuyant sur la triangulation de la méridienne, il trouva que les deux canons étaient à une distance de 9549,6 toises.

En divisant cette longueur par 54″,6, durée moyenne de propagation, l'on trouve 174,9 toises ou 340^{m},88, pour l'espace que le son a parcouru en 1″ dans la nuit du 21 juin 1822; la température était de 16° centigrades; le baromètre marquait à Villejuif 756^{mm},5, et l'hygromètre 78°.

Ainsi, à 16° la vitesse du son est de 340^{m},88.

En réduisant, par le calcul que nous verrons plus loin, cette vitesse à ce qu'elle serait pour 10°, on trouve 339 mètres, et pour la température 0° on trouve 332 mètres.

Digitized by Google

CHAPITRE II.

Évaluation numérique des sons par les vibrations des cordes, des tuyaux cylindriques, des lames, de la sirène et des roues dentées.

32. Lois générales des vibrations des cordes et des sons harmoniques qu'elles produisent. — Lorsqu'on pince une corde tendue sur un instrument quelconque, les vibrations qu'elle accomplit sont beaucoup trop rapides pour que l'on puisse en compter le nombre absolu : cependant l'on peut alors distinguer assez nettement deux phénomènes remarquables : premièrement, le son *monte* et devient plus aigu dès qu'on raccourcit la corde ou qu'on lui donne une plus forte tension, et secondement, le nombre des vibrations augmente d'une manière sensible. Ainsi, il y a certainement une dépendance entre le son de la corde, sa longueur, sa tension, et la rapidité de ses vibrations; mais cette dépendance, si facile à constater par l'expérience, ne peut être déterminée que par le secours du calcul; elle constitue ce que l'on appelle en mécanique le *problème des cordes vibrantes*, problème qui fut résolu en premier lieu par Taylor (*Methodus incrementorum*, etc., 1716), et qui eut beaucoup de célébrité, parce qu'il excita pendant près d'un demi-siècle de vives discussions entre les plus grands géomètres. Jean Bernouilli, d'Alembert, Euler et Daniel Bernouilli, avaient beaucoup écrit sur ce sujet, quand Lagrange, en 1759, presque à son début dans la carrière des sciences, eut la gloire de lever toutes les difficultés, et de mettre un terme à la discussion.

Voici les résultats auxquels on arrive par le calcul, et qui expriment les lois des vibrations des cordes :

1° *Les nombres de vibrations d'une corde sont en raison inverse de sa longueur*, c'est-à-dire que si une corde sonore quelconque est tendue sur un instrument, comme le violon, la basse, la guitare, etc., et qu'elle fasse dans un certain temps un nombre de vibrations représenté par 1, lorsqu'elle vibre à vide ou dans toute sa longueur, elle fera dans le même temps des nombres de vibrations représentés par 2, 3, 4, etc., lorsque,

Digitized by Google

sans changer sa tension, l'on fera vibrer seulement $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, etc., de sa longueur; elle ferait des nombres de vibrations représentés par $\frac{3}{2}$, $\frac{4}{3}$, $\frac{5}{4}$, etc., si l'on faisait vibrer seulement $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{4}{5}$, etc., de sa longueur. Pour limiter ainsi la partie vibrante, il suffit de promener un petit chevalet sur lequel on presse légèrement la corde avec le doigt.

2° *Les nombres de vibrations d'une corde sont proportionnels aux racines carrées des poids qui la tendent;* c'est-à-dire que si l'on représente par 1 le nombre des vibrations d'une corde qui est tendue par un poids 1, ce nombre de vibrations dans le même temps deviendra 2, 3, 4, etc., quand, *sans changer sa longueur*, on la tendra par des poids 4, 9, 16, etc.

3° *Les nombres de vibrations des cordes de même matière sont en raison inverse de leur épaisseur ou de leur diamètre*, c'est-à-dire que si l'on prend, par exemple, deux cordes de cuivre ou deux cordes d'acier comme celles d'un piano, dont l'une ait un diamètre double de l'autre, qu'on les tende par *un même poids* et qu'on en fasse vibrer *des longueurs égales*, la plus mince fera dans le même temps deux fois plus de vibrations que la plus grosse. Il est probable que deux cordes à boyau ne suivraient pas exactement cette loi, parce qu'on n'est jamais sûr qu'elles soient absolument de même matière.

4° *Les nombres de vibrations des cordes de matières différentes sont en raison inverse des racines carrées de leurs densités;* c'est-à-dire que si l'on prend, par exemple, une corde de cuivre dont la densité est presque 9, et une corde à boyau dont la densité est à peu près 1, qu'elles aient le même diamètre, qu'on les tende par des poids égaux et qu'on en fasse vibrer des longueurs égales, le nombre des vibrations de la corde de cuivre sera trois fois moindre que le nombre des vibrations de la corde à boyau. Il est évident que les lois précédentes ne peuvent s'appliquer qu'à des cordes homogènes dans leur longueur et dans leur épaisseur, et que, par exemple, elles ne s'appliquent nullement aux cordes à boyau revêtues d'un fil de métal, dont on se sert pour la harpe et pour les quatrièmes des basses et des violons. Le métal enveloppant est ici une masse inerte qui doit être entraînée par l'élasticité de la corde, et qui augmente par conséquent la durée des vibrations.

Ces principes une fois posés, il devient très-facile de représenter les sons par des nombres. On se sert pour cela d'un instru-

Digitized by Google

ment qui donne des sons purs et qui permette de mesurer avec exactitude les longueurs des cordes. Cet instrument s'appelle *sonomètre* ou *monocorde ;* on peut lui donner différentes formes ; nous supposerons que l'on emploie celui de Savart, qui est représenté Pl. 29, Fig. 7 ; il porte une corde à boyau ou une corde de métal, pour montrer que sur l'une ou sur l'autre les effets sont les mêmes. La corde est retenue par une pince c, passe sur des espèces de chevalets f et h, sur une poulie m, et s'attache à un crochet d, auquel on suspend le poids p. Le chevalet mobile h peut laisser glisser la corde sans la toucher ; on l'arrête où l'on veut, et, pour réduire la longueur de la corde, il suffit de serrer la vis de pression de ce chevalet. Nous verrons plus tard que la caisse ss' sert à renforcer le son. Supposons maintenant que la corde soit convenablement chargée pour rendre un son plein et pur en vibrant à vide, que l'on prenne ce son pour point de départ, ou pour l'*ut*, et que l'on avance peu à peu le chevalet pour obtenir successivement les autres *notes* de la *gamme*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*, *ut*, la longueur de la corde entière étant représentée par 1, on trouvera pour les autres notes les longueurs suivantes :

Noms des sons......	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut*.
Longueur des cordes.	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{1}{2}$.

Mais les nombres de vibrations de la corde étant en raison inverse de sa longueur, on aura donc, en représentant par 1 le nombre des vibrations qui donnent l'*ut* :

Noms des sons......	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut*.
Nombre des vibrations.	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2.

On sait que l'intervalle de *ut* à *ré* s'appelle une *seconde ;* de *ut* à *mi* une *tierce ;* de *ut* à *fa* une *quarte ;* de *ut* à *sol* une *quinte ;* de *ut* à *la* une *sixième ;* de *ut* à *si* une *septième ;* de *ut* à *ut* une *octave*, etc. Ainsi, quand deux sons forment l'*octave*, le nombre des vibrations du plus aigu est double du nombre des vibrations du plus grave ; pour la *tierce*, le plus grave fait 4 vibrations et le plus aigu 5 ; pour la *quarte*, le plus grave 3 et le plus aigu 4, pour la *quinte*, le plus grave 2 et le plus aigu 3, etc. Ces rapports sont invariables ; l'oreille n'y tolère aucune altération, c'est-à-dire qu'il faut, pour que deux sons soient à l'octave, que le nombre des vibrations du plus aigu divisé par le nombre des vibrations du plus grave donne 2 ; qu'il donne

Digitized by Google

$\frac{3}{2}$ pour la quinte, etc. Ainsi, le nombre des vibrations du *ré* étant $\frac{9}{8}$, son *octave aiguë* sera $\frac{9}{8} \times 2 = \frac{9}{4}$, et son *octave grave* $\frac{9}{8} : 2 = \frac{9}{16}$, etc.; sa tierce sera $\frac{9}{8} \times \frac{5}{4} = \frac{45}{32}$; sa quinte $\frac{9}{8} \times \frac{3}{2} = \frac{27}{16}$, etc.; réciproquement, le *ré* et le *sol* forment une *quarte*, parce que le rapport de sol à ré est $\frac{3}{2} : \frac{9}{8} = \frac{3}{2} \times \frac{8}{9} = \frac{4}{3}$ qui est le rapport de *quarte*, tandis que le *ré* et le *la* ne forment pas une *quinte*, parce que le rapport de *la* à *ré* est $\frac{5}{3} : \frac{9}{8} = \frac{5}{3} \times \frac{8}{9} = \frac{40}{27}$ qui n'est pas $\frac{3}{2}$ comme il est nécessaire pour la quinte, etc.

On peut d'après cela écrire facilement autant d'octaves que l'on voudra *au-dessus* ou *au-dessous* de l'octave précédente, puisqu'il suffira de multiplier tous les nombres de celle-ci par 2, par $2^2 = 4$, par $2^3 = 8$, etc., pour avoir successivement la première, la deuxième, la troisième octave *au-dessus* et de les multiplier par $\frac{1}{2}$, par $\frac{1}{2^2} = \frac{1}{4}$, par $\frac{1}{2^3} = \frac{1}{8}$, etc., pour avoir la première, la deuxième, la troisième octave *au-dessous*, etc., etc.

Ces sons ne sont pas les seuls que l'on emploie dans la musique, on emploie aussi des *dièses* et des *bémols*. Mais il est facile de s'assurer au moyen du monocorde, par des expériences analogues aux précédentes, que *diéser* un son, c'est multiplier le nombre de ses vibrations par $\frac{25}{24}$; et que le *bémoliser*, c'est le multiplier par $\frac{24}{25}$. Ainsi, tandis que l'*ut* par exemple, fait 24 vibrations, l'*ut dièse* en fait 25, et tandis que le *si* fait 25 vibrations, le *si bémol* n'en fait que 24.

Lorsque deux sons s'approchent tellement de l'unisson que l'un d'eux fait 80 vibrations tandis que l'autre en fait 81, en sorte que leur *intervalle* ou leur rapport soit $\frac{80}{81}$, on dit qu'ils ne diffèrent que d'un *comma*. Les organes exercés sentent très-bien cette différence.

Lorsqu'on fait résonner ensemble deux sons qui sont à l'*octave*, ou à la *tierce*, ou à la *quinte*, ils forment une *consonnance*, ou un *accord* : au contraire, la *seconde* et la *septième* forment une *dissonance*.

Les *sons harmoniques* sont ceux qui suivent la série des nombres naturels, 1, 2, 3, 4, 5, etc.; le deuxième est l'*octave* du premier; le troisième en est la *douzième*, ou la double quinte; le quatrième la *double octave*; le cinquième la *dix-septième* ou la triple tierce, etc.; ainsi ils ne forment jamais de dissonance. C'est sans doute pour cette raison qu'on les appelle depuis longtemps sons harmoniques; mais un phénomène remarquable est l'existence si-

multanée de tous ces sons dans les vibrations d'une seule corde. En effet, si l'on met en mouvement avec l'archet une corde de violon ou de violoncelle, on n'entend pas seulement le *son fondamental* de cette corde, celui qu'elle rend en vibrant dans toute sa longueur, mais on entend encore le son 3 ou sa douzième, et le son 5 ou sa dix-septième; il y en a même qui prétendent démêler aussi le son 6 ou sa dix-neuvième. Ce phénomène trouve son explication dans l'expérience suivante, que l'on doit à Sauveur. On place le chevalet mobile sous le milieu de la corde du monocorde, et avec le doigt on appuie *très-légèrement* sur ce point, tandis que l'on passe l'archet *près du chevalet fixe* pour ébranler l'une des moitiés de la corde; cette moitié s'ébranle en effet, mais l'autre moitié entre aussi en vibration très-visiblement, et, si l'on veut s'en assurer, il suffit de mettre en divers points près de son milieu de petits chevrons de papier qui seront lancés au loin. La figure que prend alors la corde est représentée dans la figure 8. On peut ensuite placer le chevalet mobile à la fin du premier tiers de la corde, et quand on ébranle ce premier tiers avec l'archet comme tout à l'heure, les deux autres tiers entrent à l'instant en vibration; mais chacun d'eux vibre séparément autour du point n, qui reste fixe quoique libre (Fig. 9). Pour s'en assurer, on met encore de petits chevrons de papier, en v, en n et en v'. Ceux qui sont en v et v' sautillent d'abord et sont bientôt renversés, tandis que celui qui est en n reste immobile. Le point n s'appelle un *nœud*, et les points v et v' des *ventres*.

L'expérience réussit de même lorsqu'on place le chevalet à la fin du premier quart, du premier cinquième ou du premier sixième de la corde; il y a alors 2, 3 où 4 nœuds sur lesquels les chevrons restent immobiles, tandis qu'ils sautent vers le milieu de tous les ventres.

Sauveur s'appuie sur ces résultats curieux, pour conclure qu'une corde sonore ébranlée à vide ne vibre pas seulement dans toute sa longueur, mais que chacune de ses moitiés, chacun de ses tiers, chacun de ses quarts, de ses cinquièmes et de ses sixièmes, etc., vibre séparément et produit le son qui convient à sa longueur, et que telle est la cause de la formation des harmoniques. En effet, que le milieu de la corde (Fig. 10) oscille de h en h', quand la corde vibre en totalité, ce mouvement n'empêche pas que chaque moitié ne vibre autour de lui,

Digitized by Google

comme s'il était en repos ; il en est de même de tous les nœuds correspondants à chaque tiers, à chaque quart.

33. **Lois générales des vibrations des tuyaux et du battement qui résulte de deux sons voisins.** — Les tuyaux sonores, tels qu'ils entrent dans la composition des orgues, sont en général cylindriques ou prismatiques, et disposés pour entrer en vibration par une embouchure analogue à celle du *sifflet* ou du *flageolet*. On y distingue donc le *tuyau* proprement dit, où se trouve la colonne d'air qui doit produire le son par ses mouvements oscillatoires vifs et réguliers, et l'*embouchure* qui, ordinairement, se compose elle-même de deux parties, savoir, du *pied* qui apporte le *vent*, et de la *bouche* qui fait *parler*. Les figures 18, 19, 20 et 23 représentent le tuyau de bois prismatique, et les figures 21 et 22 le tuyau cylindrique d'étain ou d'*étoffe*. Le pied *p* s'engage dans une ouverture correspondante du *sommier* ou réservoir d'air comprimé ; l'air entre par le bout inférieur du pied, et vient s'échapper au bout supérieur par la lumière *l*, espèce de fente dont la largeur et les bords doivent être disposés avec soin ; cette lame d'air, toujours très-mince, est dirigée un peu obliquement et vient raser le *biseau* ou l'extrémité de la *lèvre supérieure* b', où elle se brise en partie. La colonne d'air du tuyau d'abord refoulée par la pression qu'elle en reçoit revient par son élasticité, et prend ainsi le mouvement rapide de vibration qui fait l'onde sonore. On comprend d'après cela que la lumière et le biseau sont les deux pièces importantes de l'embouchure, et qu'un tuyau parle bien ou mal suivant la forme et la grandeur de sa *bouche*, c'est-à-dire suivant la distance qu'il y a entre la lèvre supérieure b' et la lumière ou la lèvre inférieure *b*. On démontre cette influence en ajustant un tuyau de manière que sa lèvre supérieure soit mobile (Fig. 23).

Pour donner le vent aux tuyaux dans les expériences, on se sert d'un soufflet ordinaire ss' (Fig. 11), qui se gonfle au moyen de la pédale *p* ; le petit conduit ff' apporte le vent dans la caisse cc', dont la table supérieure est percée d'une douzaine de trous *oo* ; ces trous sont fermés par de petites soupapes à ressort, et s'ouvrent à volonté au moyen des touches hh'.

Un tuyau étant mis en place et le soufflet gonflé, on met le doigt sur la touche, et, au moyen de la tige tt' que l'on presse plus ou moins, on donne le vent avec plus ou moins de force.

Digitized by Google

Supposons d'abord que le *tuyau* soit ouvert et qu'il ait partout le même diamètre, en lui donnant le vent avec plus ou moins de force, et en changeant, s'il le faut, la grandeur de la bouche, on parviendra à lui faire rendre différents sons; et, si l'on représente par 1 le *son fondamental*, c'est-à-dire le plus grave qu'il puisse donner, les autres sons formeront avec lui la série des nombres naturels 1, 2, 3, 4, etc., et, quelque moyen que l'on essaye, on ne parviendra jamais à lui faire rendre un son quelconque compris entre ceux-là.

Tous les tuyaux cylindriques ou prismatiques de même longueur donneront à peu près le *même son fondamental* et la même série 2, 3, 4, etc., pourvu que leur longueur soit 10 ou 12 fois leur diamètre, et que la matière qui les compose ait une rigidité convenable : seulement, si les tuyaux sont d'un petit diamètre, ils octavieront presque toujours, c'est-à-dire qu'ils donneront le son 2 et les suivants, et il sera très-difficile d'en tirer le son fondamental.

Quand le tuyau rend le son 2, on peut le couper par le milieu et enlever sa moitié supérieure sans que le son soit changé; de même, quand il produit le son 3, on peut le diviser en trois et enlever l'un des tiers et même les deux tiers supérieurs, etc.

Ainsi, pour le son 2, il y a un *ventre* au milieu de la longueur du tuyau, c'est-à-dire que la couche d'air qui s'y trouve n'est, pendant la vibration sonore, ni raréfiée ni condensée; car si elle éprouvait un changement de densité, on ne pourrait pas en ce point faire une ouverture sans altérer le son, et à plus forte raison ne pourrait-on pas enlever la moitié supérieure du tuyau. Pour le son 3 il y a deux *ventres intermédiaires*, l'un à la fin du premier tiers, l'autre à la fin du second tiers de la longueur; car, si l'on fait des ouvertures dans ces points (Fig. 23), le son n'est pas changé, et il l'est toujours si l'on fait des ouvertures ailleurs. Il y a trois ventres intermédiaires pour le son 4; quatre pour le son 5, etc.

C'est à Daniel Bernouilli que l'on doit ces expériences et les premières notions exactes sur la théorie des instruments à vent (*Acad. des Scienc.*, 1762); on en conclut que l'onde sonore qui correspond au son fondamental d'un tuyau a la même longueur que ce tuyau; que celle qui correspond au son 2 a une longueur moitié; que celle du son 3 est $\frac{1}{3}$ du tuyau; celle du son 4 seulement $\frac{1}{4}$, etc. : car les deux extrémités d'un tuyau sont essen-

Digitized by Google

tiellement des ventres où la couche d'air ne peut être ni condensée ni raréfiée, puisqu'elle communique avec l'air extérieur, et l'espace compris entre deux ventres est toujours égal à la longueur de l'onde.

Mais entre deux *ventres* consécutifs il y a toujours un *nœud* ou une *surface nodale*, c'est-à-dire une surface immobile où deux vitesses égales et opposées se détruisent en imprimant à la couche d'air des changements continuels de densité, soit par *condensation* quand elles pressent de chaque côté de cette surface, soit par *dilatation* quand elles tirent. L'existence de cette surface nodale se démontre aisément : on fait résonner un tuyau vertical de verre de longueur convenable ayant 2 ou 3 centimètres de diamètre, et, avec un fil de soie, on fait descendre dans son intérieur un anneau léger sur lequel est tendue une membrane de baudruche, couverte de sable fin; partout le sable est mis en mouvement et saute avec plus ou moins de force, excepté quand la baudruche arrive à la hauteur de la surface nodale, là le sable est immobile et démontre ainsi l'immobilité de la couche d'air qui le touche. Si, par exemple, le tuyau rend le son 3, on trouve trois nœuds, au milieu du premier, du second et du troisième tiers.

Pour les *tuyaux fermés*, la loi des vibrations est différente, on peut en faire l'expérience avec un tube de verre d'environ 1 mètre de longueur sur 2 ou 3 centimètres de diamètre (Fig. 16) : dans lequel on fait glisser un piston *p* au moyen de la tige *t*. Après avoir ajusté le tube sur une embouchure convenable, on l'adapte au soufflet, et en laissant passer le courant d'air d'abord très-lentement, on obtient le son fondamental que nous représenterons par 1, un courant un peu plus fort fait sortir le son 3; et en augmentant progressivement la force du courant par une pression croissante, on fait sortir à la suite les sons 5, 7, 9, etc.; ainsi un tuyau fermé, de longueur constante, rend différents sons qui suivent la série des nombres impairs 1, 3, 5, 7, etc., sans qu'il soit possible d'en faire sortir aucun son intermédiaire.

A cette loi il faut ajouter encore ce fait remarquable, que le son fondamental d'un *tuyau fermé* et le son fondamental d'un *tuyau ouvert*, de même longueur, sont toujours à l'octave, et que le tuyau fermé donne le son grave ou le son 1, tandis que le tuyau ouvert donne le son aigu ou le son 2. C'est ce qui est

facile à vérifier par l'expérience. Comme, d'une autre part, l'onde correspondante au son fondamental d'un tuyau ouvert a une longueur égale à celle du tuyau, il en résulte que *l'onde* correspondante au son fondamental d'un *tuyau fermé* a une *longueur double* de celle du tuyau. Daniel Bernouilli explique ce fait en admettant que le mouvement du son va se réfléchir sur le fond du tuyau et revient vers l'embouchure, le plan immobile du fond formant ainsi le nœud qui doit se trouver au milieu de l'onde dont les deux extrémités sont à l'embouchure; cette hypothèse explique aussi comment le son 3 est le premier qui puisse succéder au son fondamental; car, si l'on divise la longueur du tuyau en trois parties égales (Fig. 17) *et*, *tt'*, *t' f*, on pourra considérer les deux premiers tiers *et'* comme formant un tuyau ouvert qui vibre à l'unisson du tuyau fermé *t' f*, formé par le troisième tiers, et le son produit est évidemment le son 3, puisque *et'* est le tiers en longueur du tuyau ouvert qui donnerait le son fondamental, et *t' f* aussi le tiers du tuyau fermé *ef*. S'il en est ainsi, le deuxième son du tuyau fermé *ef* doit être le même que le son fondamental d'un tuyau fermé dont la longueur serait *t' f* ou *et* : en effet, lorsqu'on enfonce le piston jusqu'en *t*, on retombe exactement sur le deuxième son qui était produit lorsque le piston était en *f*. Il en résulte donc que, pendant les vibrations qui donnent le deuxième son, la couche d'air *t* n'éprouve point d'oscillations; elle est le *nœud* du tuyau ouvert *et'*. Ainsi pour le deuxième son d'un tuyau fermé, il y a dans la longueur de ce tuyau deux *ventres* et deux *nœuds* : le premier ventre est à l'embouchure *e*, le deuxième est aux deux tiers de la longueur en *t'*; et le premier nœud est au premier tiers en *t*, le deuxième est au fond du tuyau en *f*.

Pour le troisième son qui est le son 5, il y a 3 ventres et 3 nœuds : le premier ventre est toujours à l'embouchure, le deuxième aux $\frac{2}{5}$, et le troisième aux $\frac{4}{5}$; le premier nœud est à $\frac{1}{5}$, le deuxième à $\frac{3}{5}$, et le troisième à $\frac{5}{5}$, c'est-à-dire au fond.

De même pour le son 7 il y a 4 ventres et 4 nœuds, pour le son 9, 5 ventres et 5 nœuds, etc.

On peut vérifier, par l'expérience, le lieu et l'existence de tous les ventres et de tous les nœuds correspondants à un son quelconque : pour cela, il suffit de faire des ouvertures en tous les points que nous venons de désigner comme appartenant aux

Digitized by Google

ventres (Fig. 23), le son ne sera pas changé; et l'on pourra aussi, au moyen de la tige *t* du piston *p* (Fig. 16), pousser ce piston dans tous les points que nous venons de désigner comme appartenant aux nœuds; le son n'en recevra non plus aucune altération, il restera le même pour toutes ces positions du piston.

Il résulte de tout ce qui précède que, pour monter une gamme avec des tuyaux ouverts ou fermés en tirant seulement leur son fondamental, il suffira de prendre huit tuyaux ouverts dont les longueurs soient entre elles comme les nombres 1, $\frac{8}{9}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{8}{15}$, $\frac{1}{2}$, ou huit tuyaux fermés dont les longueurs soient dans le même rapport. L'expérience semble en ce point s'écarter un peu de la théorie, car des tuyaux qui auraient exactement les rapports précédents donneraient une gamme fausse; mais cela tient à ce que la colonne d'air éprouve à ses extrémités et surtout près de l'embouchure des mouvements très-compliqués dont nous parlerons chapitre IV, cependant il suffit d'altérer très-peu les proportions précédentes pour avoir une gamme parfaitement juste.

Lorsqu'on fait vibrer ensemble deux tuyaux qui donnent des sons très-rapprochés, comme, par exemple, l'*ut* et l'*ut dièse*, on entend à de petits intervalles un renflement très-sensible dans le son; c'est ce phénomène remarquable que les organistes appellent le *battement*. Sauveur en a le premier donné l'explication. Lorsque nous entendons à la fois deux sons dont l'un fait 24 vibrations, tandis que l'autre en fait 25, il est évident qu'à chaque 24ᵉ vibration du premier ou à chaque 25ᵉ vibration du second, les ondes sonores recommencent à partir ensemble, et leurs commencements viennent ensemble frapper l'oreille, et c'est cette coïncidence qui produit le battement. Ainsi, plus les sons diffèrent entre eux, plus les battements sont fréquents : et au contraire, plus les sons approchent de se confondre, et plus les battements sont rares. Ce phénomène ne s'observe que difficilement entre les sons qui résultent des vibrations des cordes, parce qu'en général ils ont une moindre intensité : cependant Rameau en a aussi reconnu l'existence, et l'on sait tout le parti qu'il en a su tirer pour fonder un système de musique dont on ne parle plus guère.

34. Lois des vibrations des lames ou des tiges. — Une lame ou une tige qui est fixée solidement par une de ses extrémités (Fig. 6), et qui est frottée par un archet ou simplement écartée de sa position avec la main, exécute de *l* en *l'* une série de vi-

brations isochrones, qui deviennent, si elles sont assez rapides, de véritables vibrations sonores. Ces vibrations dépendent évidemment de l'épaisseur, de la longueur, de la densité et de l'élasticité de la matière soumise à l'expérience. Daniel Bernouilli et Euler ont cherché la liaison théorique de ces divers éléments, et les formules auxquelles ils sont parvenus donnent les lois suivantes quand il s'agit d'une même substance ayant le même degré de rigidité :

1° Le nombre des vibrations est indépendant de la largeur de la lame;

2° Il est proportionnel à l'épaisseur;

3° L'épaisseur étant la même, il est en raison inverse du carré de la longueur.

Chladni avait constaté que ces lois se vérifient sensiblement par l'expérience; cependant M. Baudrimont, en opérant sur des lames de cristal, de zinc, de cuivre, de cristal de roche et de hêtre (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXII, ann. 1851), trouve qu'il se manifeste des écarts notables et toujours dans le même sens, surtout quand l'épaisseur des lames approche de 8 ou 10 millimètres.

Ces lois se rapportent au cas où la lame, fixée ou encastrée par une de ses extrémités, vibre dans toute sa longueur sans se partager en *ventres* et en *nœuds*, comme nous le verrons plus loin.

35. Loi des vibrations de la sirène. — Cet instrument, imaginé par M. Cagniard de La Tour, est disposé de la manière suivante :

tt' ff' (Fig. 13), boîte cylindrique de cuivre, ayant 8 ou 10 centimètres de diamètre et environ 3 centimètres de hauteur; la surface supérieure de la table *tt'* est plane et très-polie.

ss' ouverture percée au milieu du fond *ff'*.

yy', tuyau *porte-vent* qui se visse ou s'ajuste dans l'ouverture *ss'*.

v, ouvertures percées dans la table *tt'*; elles sont disposées circulairement et équidistantes entre elles (Fig. 14) : on en peut faire 10, par exemple, et on leur donne de telles dimensions que les intervalles pleins qui les séparent aient un peu plus de largeur que les ouvertures elles-mêmes.

pp', plateau mobile dont la surface inférieure s'applique exactement sur la table, sans cependant exercer de frottement sensible.

Digitized by Google

x, axe qui porte le plateau pp' et qui peut tourner avec lui d'un mouvement plus ou moins rapide.

u, ouvertures percées dans le plateau pp', et exactement correspondantes aux ouvertures v de la table, par leur nombre, leur position et leurs distances respectives. Ainsi, toutes les ouvertures de la table sont ouvertes à la fois ou fermées à la fois, suivant que la rotation du plateau amène sur elles les ouvertures u ou les intervalles pleins qui séparent ces ouvertures.

i, vis sans fin qui se trouve vers la partie supérieure de l'axe de rotation x.

rr', roue de 100 dents que la vis sans fin met en mouvement.

cc', roue indépendante qui ne passe qu'une dent pour chaque révolution de la roue rr'; c'est un bras fixé à l'axe de rr' qui vient la pousser d'un cran.

Les axes de ces roues portent des aiguilles qui parcourent des cadrans divisés d et d' (Fig. 12); ces aiguilles et les roues qui les mettent en mouvement forment le *compteur* de la sirène. On peut à volonté faire marcher le compteur ou l'arrêter : pour cela, il suffit de presser le bouton b pour faire engrener la roue rr' avec la vis sans fin, ou le bouton b' pour désengrener; dans ce dernier cas, les dents de cette roue vont heurter contre un arrêt qui amortit immédiatement la vitesse acquise.

Nous devons ajouter encore que les ouvertures du plateau sont inclinées aux faces (Fig. 15), de telle sorte que la vitesse du vent qui est poussé dans la boîte par le porte-vent suffit pour imprimer au plateau un mouvement de rotation de plus en plus rapide.

Cela posé, pour comprendre le jeu de la sirène comme instrument d'acoustique, imaginons pour un moment qu'il n'y ait qu'un seul trou dans la table et dix dans le plateau. Alors, pendant une révolution du plateau, le trou de la table sera 10 fois ouvert et 10 fois fermé, et par conséquent l'écoulement de l'air qui arrive par le porte-vent aura lieu 10 fois et sera 10 fois arrêté. Cet effet se produira dans 1″ ou dans 1″/10 ou dans 1″/100, suivant que le plateau fera 1 tour, 10 tours ou 100 tours par seconde; et, comme l'air qui est vivement poussé et brusquement arrêté produit à chaque alternative une vibration, il en résulte que l'on aura de la sorte 20 vibrations pour chaque tour du plateau, et par conséquent 20, 200 ou 2000 vibrations par seconde. Ainsi la sirène doit rendre des sons qui mon-

Digitized by Google

tent par degré, ou plutôt par nuances insensibles, depuis le plus grave jusqu'au plus aigu. Et c'est en effet ce que l'expérience confirme. Maintenant, si au lieu de supposer, comme nous l'avons fait, un seul trou dans la table, on suppose qu'il y en ait 10 comme dans le plateau, on aura seulement un son 10 fois plus intense, car chaque trou produira son effet comme s'il était seul.

Le nombre, la forme et la grandeur des trous paraissent avoir sur le *timbre* du son une influence dont jusqu'à présent on ne s'est rendu compte que par des considérations trop peu rigoureuses pour qu'il nous soit permis de les développer ; il en est de même des divers effets que l'on obtient en laissant entre les trous des intervalles pleins plus ou moins grands : seulement, M. Cagniard de La Tour pense que, si les intervalles pleins sont très-petits, le son se rapproche de la voix humaine, et que s'ils sont très-grands, le son se rapproche de celui de la trompette. Enfin, l'épaisseur de la table et celle du plateau doivent aussi imprimer aux sons des caractères particuliers qui sont encore trop peu étudiés.

36. **Détermination d'un son fixe ou du nombre absolu des vibrations qui correspondent à un son donné.** — On peut compter de diverses manières le nombre absolu des vibrations qui correspondent à un son quelconque : on y parvenait autrefois par les lois des vibrations des cordes ou des lames, ou par le battement des tuyaux ; mais l'on y parvient aujourd'hui d'une manière plus directe et plus précise au moyen de la sirène et au moyen des roues dentées.

Sirène. — Pour déterminer, au moyen de la sirène, le nombre des vibrations qui correspond par exemple au *diapason* dont on se sert pour accorder les instruments de musique, il suffit de mettre sur la table du soufflet (Fig. 11) un tuyau ouvert ou fermé dont le son fondamental soit à l'unisson du diapason; alors à côté de ce tuyau, on met la sirène elle-même, et l'on donne le vent, en variant la pression au moyen de la tige *t*, jusqu'à ce que l'on parvienne à mettre la sirène à l'unisson avec le tuyau voisin; cet unisson obtenu, on le soutient pendant quelques minutes, ce qui exige seulement un peu d'habitude, ensuite, pendant que les sons se produisent, on presse à la fois le bouton du compteur de la sirène, pour faire engrener la roue, et le bouton d'un bon chronomètre pour mesurer le

Digitized by Google

temps ; après avoir soutenu l'accord attentivement pendant 2′ environ, il faut arrêter à la fois le compteur et le chronomètre. On a ainsi par le compteur le nombre des vibrations, et par le chronomètre le temps qui s'est écoulé ; ce qui permet de déduire aisément combien il y a eu de vibrations en 1″. En répétant plusieurs fois l'expérience, on trouve des nombres parfaitement concordants, desquels il résulte que le *la* du diapason ordinaire correspond à 440 trous du plateau passant sur un trou de la table, ou à 880 vibrations simples en 1″, car pour chaque trou qui passe la vibration est double, c'est-à-dire composée d'une onde condensée et d'une onde raréfiée.

Roues dentées. — C'est à Savart que l'on doit ce nouveau mode de produire des sons et de compter le nombre absolu des vibrations (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XLIV et XLVII); l'appareil qu'il a imaginé dans ce double but est représenté dans les figures 31 et 32 : *a* est un banc de bois de chêne, très-solide, que l'on rend plus stable encore, soit en le fixant sur le sol, soit en le contre-buttant de différents côtés ; *b* est une roue de $1^m,80$ de diamètre, portée par un axe très-fort *c*, et mise en mouvement au moyen d'une manivelle ; *d* est un second axe destiné à recevoir un mouvement de rotation très-rapide par la courroie *x*, qui passe sur la grande roue et sur une petite poulie de l'axe *d* ; pendant que la roue fait un tour, la poulie en fait, par exemple, dix ; par conséquent, si la roue fait quatre tours par seconde, l'axe en fera quarante. L'axe *d* porte une roue dentée de métal *d′*, dont le nombre des dents peut être de 600 ; et, lorsqu'on présente la tranche d'une carte au choc successif des dents qui passent avec rapidité, l'on peut obtenir ainsi 24 000 chocs en 1″ ; on est maître d'en obtenir plus ou moins, en tournant plus ou moins vite, ou en montant sur l'axe *d* diverses roues dont le nombre des dents soit variable. Dans tous les cas, le son que l'on obtient est pur, continu, bien caractérisé, et d'autant plus aigu que les chocs se répètent à des intervalles plus rapprochés ; il est par conséquent très-facile de le mettre d'accord avec le diapason, et de le soutenir à l'unisson aussi longtemps que l'on veut. Or, le choc des dents contre la tranche de la carte produit un son, parce que la carte est mise en vibration ; pendant que la dent passe, la carte est pressée dans un sens, puis elle revient par son élasticité au-devant de la dent suivante, en sorte qu'en réalité elle vibre comme une

Digitized by Google

lame ou comme une corde, accomplissant par l'effet de chaque dent une vibration double, c'est-à-dire, une allée et une venue, ou, pour mieux dire, une onde condensée et une onde raréfiée. Il y a donc en 1" autant de vibrations doubles qu'il y a de dents qui passent, et il suffit de compter le nombre de ces dents pour avoir le nombre des vibrations. Dans ce but, l'axe *d* porte une vis sans fin qui engrène dans une roue destinée à servir de compteur : ce compteur est du reste analogue à celui de la sirène. Par des expériences très-précises, Savart a constaté que le *la* de notre diapason correspond à 880 vibrations simples, comme on l'avait constaté avec la sirène, mais d'une manière moins facile et moins sûre.

Connaissant une fois le nombre des vibrations qui correspond à un son dont le rang est connu dans les gammes musicales, il est très-facile d'obtenir le nombre des vibrations correspondant à un autre son quelconque. Le *la* du diapason étant un la_3 et le *la* du violoncelle un la_2, il en résulte que celui-ci fait 440 vibrations, le la_1 220, le la_{-1} 110, et le la_{-2} seulement 55, en sorte que l'ut_{-1} en fait 33.

La voix d'homme s'étendant en général du sol_2 au sol_4, et la voix de femme du $ré_3$ à l'ut_5, il est facile de voir que les nombres de vibrations sont dans le premier cas 396 et 1584; et dans le deuxième 594 et 2112; ainsi l'organe de la voix humaine exécute 396 vibrations par seconde en formant les sons musicaux les plus graves, et 2112 en formant les sons les plus aigus.

Au reste, tous ces résultats sont encore confirmés par les vibrations des lames, des tuyaux et des cordes : pour les cordes, la théorie donne immédiatement le nombre des vibrations par la formule

$$n^2 = \frac{gp}{cl},$$

dans laquelle n est le nombre des vibrations en 1", g la gravité ou $9^m,808$, p le poids qui tend la corde, l la longueur de la corde, et c le poids de la longueur l.

37. De la longueur absolue des ondes sonores. — Pour déterminer la longueur absolue des ondes sonores dans un milieu quelconque, il suffit de connaître la vitesse avec laquelle le son se propage dans ce milieu et le nombre des vibrations qui pro-

Digitized by Google

duisent le son. Dans l'air, par exemple, la vitesse du son étant de 340 mètres par seconde, il est évident qu'un son qui résulterait de 340 vibrations par seconde donnerait des ondulations de 1 mètre de longueur ; car chaque vibration excite une onde, et les 340 ondes qui sont excitées en 1″ occupent précisément 340 mètres de longueur. On voit donc qu'en général la longueur de l'onde est le quotient de la vitesse du son par le nombre des vibrations. Ainsi la longueur de l'onde de l'ut_{-1} est de 340 mètres divisés par 33, ou de 10 mètres et un tiers; c'est le son le plus grave qui soit employé en musique; il est donné par le gros bourdon du jeu d'orgue qui est un tuyau de 16 pieds, bouché, donnant une ondulation de 32 pieds sans le trouble qui se produit à l'embouchure.

38. **De la limite des sons perceptibles.** — On avait pensé pendant longtemps que le son correspondant à 32 vibrations simples était le plus grave que l'oreille humaine pût entendre; mais Savart a fait voir que la sensibilité de l'organe de l'ouïe avait été établie sur des données fort incertaines, et, par une série d'expériences extrêmement remarquables, il a tracé la route qu'il fallait suivre pour résoudre cette question importante (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XLIV et XLVII). Pour les sons graves, il a substitué à la roue dentée de la figure 32 une simple barre de fer ou de bois représentée (Fig. 31), et il a fait voir qu'en disposant sur le banc de l'appareil des planchettes de bois, formant une espèce de cadre dans lequel passe la barre pendant son mouvement, l'on obtient à chaque passage un bruit explosif d'une intensité véritablement assourdissante; cette intensité paraît avoir son maximum quand la barre, en passant dans le cadre, en rase les bords à la distance de 1 à 2 millimètres. Les explosions sont d'abord distinctes et successives quand le mouvement de la barre est très-lent; mais, dès qu'il acquiert assez de vitesse pour qu'il y ait 7 ou 8 chocs, ou plutôt 7 ou 8 passages de la barre par seconde, le son devient parfaitement continu, et il a en même temps une force et une gravité des plus remarquables. Ainsi, l'oreille humaine perçoit distinctement des sons graves qui correspondent à 14 ou 15 vibrations simples par seconde, car chacune des explosions dont il s'agit produit évidemment une vibration double, c'est-à-dire, une onde condensée et une onde raréfiée. Pour trouver la limite des sons aigus, Savart a, au contraire, substitué à la barre une

Digitized by Google

roue dentée d'un grand diamètre portant jusqu'à 720 dents, de manière à faire passer 24 000 dents par seconde, ce qui donne 48 000 vibrations simples, et le son qui en résultait était encore perceptible, quoique excessivement aigu. Ainsi, notre organe est constitué avec une si merveilleuse délicatesse, qu'il peut entendre et distinguer les uns des autres tous les sons qui se trouvent compris entre 15 vibrations et 48 000 vibrations par seconde. Encore ne peut-on pas dire que ce sont là les vraies bornes de sa sensibilité : nous pensons avec Savart que, hors de ces limites, il y a encore des sons qui deviendraient percèptibles, s'ils avaient assez d'intensité.

CHAPITRE III.

Vibrations des Corps solides.

39. **Vibrations des corps dont deux dimensions sont petites par rapport à la troisième. Tubes, verges cylindriques, verges prismatiques, etc.**— Nous avons déjà vu (34) que les lames, les tiges ou les cylindres peuvent éprouver des vibrations rapides et exciter des ondes sonores lorsqu'on les ébranle perpendiculairement à l'axe; mais nous n'avons considéré que le cas le plus simple de ces *vibrations transversales*, celui qui a lieu quand la lame entière, passant à la fois d'un côté à l'autre de sa position d'équilibre, produit le son fondamental. Or, il arrive que sans sortir de ce mode de vibration, la lame peut se partager en diverses parties vibrantes, séparées par des surfaces nodales perpendiculaires à l'axe; alors elle produit des sons d'autant plus aigus que le nombre de ces divisions est plus considérable. Pour obtenir ces phénomènes curieux, il suffit de disposer la lame horizontalement, sur deux ou plusieurs appuis de liége taillés en prisme, et solidement collés sur des masses pesantes de plomb, pour en assurer la fixité; ensuite, passant un archet sur l'une des arêtes, la lame se met à vibrer suivant l'un des modes qui lui sont propres. Si l'on veut marquer les lignes nodales, il suffit de jeter sur la surface de la lame un peu de sable fin, qui vibre avec elle, se déplace en sautant, et vient marquer tous les *nœuds* ou toutes les lignes de repos. Les arêtes des supports de liége peuvent ne pas correspondre tout à fait à un nœud, mais ils s'en trouvent toujours peu éloignés, et le son devient plus net lorsqu'on les déplace pour établir cette coïncidence. Sur une lame de laiton, d'un demi-mètre de longueur, bien travaillée et d'une épaisseur convenable, on peut ainsi obtenir depuis 1 jusqu'à 8 ou 10 nœuds.

M. Lissajous a fait récemment sur ce sujet des recherches très-intéressantes (*Ann. de Chim et de Phys.*, t. XXX, ann. 1850); après avoir mesuré avec soin les internœuds ou intervalles nodaux, il a voulu en trouver la loi mathématique, et il y est parvenu en

résolvant habilement des équations qui avaient été posées autrefois par Euler, et qui contenaient implicitement la solution du problème. Voici le résultat de ses calculs et de ses expériences, pour le cas où la lame est posée comme nous l'avons dit, ayant ses deux extrémités libres :

a, étant la longueur de la lame,

n, le nombre des nœuds,

z, l'intervalle compris entre deux nœuds vers le milieu de la lame,

z', l'intervalle compris, soit entre le deuxième nœud et la première extrémité; soit entre l'avant-dernier et la deuxième extrémité,

z'', l'espace libre, en deçà du premier nœud ou au delà du dernier,

On a toujours les relations suivantes :

$$z = \frac{2a}{2n-1}; \quad z' = \frac{5a}{4n-2}; \quad z'' = \frac{0,6608.a}{2n-1};$$

d'où il résulte :

1° Que tous les nœuds intermédiaires sont équidistants, et que leur intervalle est égal au double de la longueur de la lame, divisé par le double du nombre des nœuds moins 1.

2° Que la longueur relative des espaces libres aux deux extrémités, exprimée par $\frac{z''}{z}$ est égale à 0,3304, c'est-à-dire, à très-peu près le tiers de l'intervalle des nœuds intermédiaires.

3° Que l'intervalle relatif du premier nœud au deuxième, ou du dernier à l'avant-dernier, exprimé par $\frac{z'-z''}{z}$ est égal à 0,9196, ou environ les 92 centièmes seulement de l'intervalle des nœuds intermédiaires.

M. Lissajous a examiné, avec le même soin et le même succès, les cinq autres cas des vibrations transversales, savoir :

2° Quand la lame est fixée à ses deux extrémités;

3° Libre à une extrémité et fixée à l'autre;

4° Libre à une extrémité appuyée à l'autre;

5° Fixée à une extrémité, appuyée à l'autre;

6° Appuyée à ses deux extrémités.

Pour le deuxième cas, les espaces libres disparaissent, les extrémités forment elles-mêmes le premier nœud et le dernier. Alors z et z' conservent leur forme et leur valeur.

Pour le troisième cas, l'espace libre disparaît à l'extrémité fixée qui devient un nœud, z'' ne convient donc qu'à l'extrémité libre, z' pareillement, mais $\frac{z'-z''}{z}$ convient aux deux extrémités.

Pour le quatrième et le cinquième cas, il faut dans les valeurs de z, z', z'' changer a en $2a$ et n en $2n-1$,

Enfin dans le sixième cas, les deux extrémités appuyées doivent elles-mêmes être considérées comme des nœuds, alors tous les internœuds sans exception sont égaux et l'on a $z = \frac{a}{n-1}$.

Quant à la valeur des sons, M. Lissajous simplifie les règles qui avaient été données, en démontrant que, dans tous les cas, ils sont exprimés par $\frac{a^2}{z^2}$, sous la seule condition de prendre pour son 1 celui qui est produit par la lame quand elle vibre avec deux nœuds ayant ses deux extrémités appuyées.

Nous allons maintenant considérer les *vibrations longitudinales*, c'est-à-dire, celles que l'on peut exciter dans les tubes, les verges, les cordes, etc., en imprimant à leurs molécules des vitesses parallèles à l'axe.

Supposons, par exemple, que l'on prenne un tube de verre d'environ deux mètres de longueur et de trois ou quatre centimètres de diamètre, et qu'en le soutenant d'une main, juste en son milieu, on exerce de l'autre main, sur l'une de ses moitiés, une légère friction avec un morceau de drap mouillé : à l'instant on entendra un son, et avec un peu d'habitude on parviendra à lui donner beaucoup d'éclat et de pureté. Les vibrations que l'on détermine ainsi sont évidemment des vibrations longitudinales. En frottant toujours de la même manière par un mouvement de va-et-vient, mais avec plus ou moins de vitesse, et en pressant plus ou moins, on pourra produire une série de sons différents, et, si l'on représente par 1 le premier son de la série, c'est-à-dire, le plus grave, il sera facile de constater que les autres se trouvent représentés par la suite des nombres naturels 2, 3, 4, etc.; il sera déjà difficile de faire sortir le son 4 quand le tube n'aura que deux mètres de longueur.

On obtiendra les mêmes résultats avec de longues lames prismatiques de verre, ou avec des cylindres pleins de la même substance, et aussi avec des tubes, des lames et des cylindres de bois

ou de métal. Seulement, pour ces derniers, il sera beaucoup plus commode d'adopter un autre mode d'ébranlement : au lieu de frotter avec du drap mouillé, on pourra frotter avec du drap enduit de résine, ou, ce qui sera plus sûr encore, on pourra fixer avec de la cire à cacheter, à l'une des extrémités des cylindres ou des lames et sur le prolongement de leur axe, un petit tube de verre creux ou plein, d'environ un décimètre de longueur et de 5 ou 6 millimètres de diamètre ; c'est alors ce tube auxiliaire qui sera ébranlé avec du drap mouillé, et les vibrations se communiqueront sans peine.

Ainsi, quand les verges droites sont soutenues au milieu et libres à leurs extrémités, elles vibrent comme les tuyaux ouverts, et *rendent des sons qui suivent la série des nombres naturels* 1, 2, 3, 4, etc.

Il est facile de s'assurer par l'expérience que *des verges de même substance sont toujours à l'unisson pour leur son fondamental quand elles ont la même longueur*, quelle que soit leur largeur ou leur épaisseur, pourvu toutefois que ces deux dimensions restent toujours petites par rapport à la troisième. Ainsi, toutes les verges du même verre de 2 mètres de longueur donneront le même son, qu'elles soient minces ou épaisses et qu'elles soient travaillées en lames, en tubes ou en cylindres. Mais, à égalité de longueur, des verges de diverses substances donneront des sons différents.

Pendant que ces corps solides sont en vibration, le mouvement se distribue très-inégalement dans toutes leurs molécules ; la plupart d'entre elles font des excursions plus ou moins grandes, et il y en a au contraire, mais en petit nombre, qui restent toujours en repos. La série des points de repos forme, sur la surface, des lignes que l'on nomme *lignes nodales;* et nous allons faire voir, d'après les ingénieuses observations de Savart, que, dans les vibrations dont il s'agit, les lignes nodales tracent autour des tubes et des cylindres, des courbes à peu près semblables *aux hélices*, c'est-à-dire *aux filets d'une vis*, et que les courbes plus irrégulières qu'elles tracent autour des lames prismatiques semblent imiter encore des hélices plus ou moins imparfaites.

Supposons d'abord que l'on expérimente sur un long tube de verre dont on tire seulement le son fondamental : on tient ce tube à peu près horizontalement; sur celle de ses moitiés qui n'est pas frottée avec le drap mouillé, on passe un anneau de papier très-

léger (Pl. 30, Fig. 14) d'un grand diamètre, et l'on observe ses mouvements. Aussitôt que le son se fait entendre, l'anneau glisse sur la surface du tube avec vivacité, et s'arrête enfin en un certain point auquel il revient sans cesse quand on l'en écarte. On marque ce point avec de l'encre; il fait évidemment partie de la ligne nodale. Ensuite on fait un peu tourner le tube dans la main, pour amener en dessus une autre arête sur laquelle repose l'anneau, et l'on recommence les vibrations: on voit encore l'anneau qui glisse et s'arrête; ce qui donne un second point de la ligne nodale, que l'on marque comme le premier. En continuant de tourner le tube peu à peu et dans le même sens, on peut successivement marquer tous les points de la ligne nodale, et l'on démontre ainsi qu'elle forme une espèce d'hélice irrégulière dont le pas est très-allongé, et qui fait plusieurs révolutions autour du tube. C'est ce que nous avons essayé de représenter (Fig. 14 et 15). En retournant le tube pour mettre l'anneau sur son autre moitié, on y trouve une courbe toute pareille, avec cette circonstance singulière, que l'une de ces courbes n'est pas la continuation de l'autre, mais que toutes deux semblent partir du milieu et s'enrouler dans le même sens, ou en sens contraire; quelquefois même ce renversement se manifeste sur chaque moitié de la tige.

La surface intérieure du tube présente une ligne nodale, analogue à celle de la surface extérieure. Pour en constater la trace, Savart met dans le tube, bien desséché, un peu de sable dont les grains soient pareillement très-secs et assez gros, ou bien une petite balle de liége ou de cire.

Lorsqu'au lieu de tirer d'un tube le son fondamental, on tire les sons 2, 3 ou 4, on retrouve encore des lignes nodales analogues aux précédentes; seulement, il y a toujours 2, 3 ou 4 *renversements* dans la direction de l'hélice.

Les lignes nodales des verges prismatiques sont plus compliquées; mais celles des bandes très-longues et assez minces, comme des bandes de verre à glace de 2 ou 3 mètres de longueur sur 3 ou 4 centimètres de largeur, présentent en général une opposition remarquable. Après avoir reconnu les lignes nodales d'une face, si l'on retourne la lame, on obtient sur l'autre face des nœuds qui correspondent précisément aux ventres de la première (Pl. 30, Fig. 4).

La cause de ces phénomènes a été longtemps inconnue; mais

Savart en a découvert le principe, et il a donné ainsi à la théorie de l'acoustique une base qui lui manquait : nous essayerons seulement de donner ici une idée de ce travail difficile, qu'il résume lui-même de la manière suivante (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. LXV) :

« *Premièrement*. Les lignes nodales, indiquées par le sable ou par tout autre procédé, sur les faces des corps qui exécutent des vibrations longitudinales, sont produites par des inflexions alternatives engendrées périodiquement par les contractions longitudinales, et qui s'effacent à chaque dilatation. Ces inflexions périodiques constituent une espèce particulière de mouvement normal qui ne se compose que de demi-oscillations dont le nombre est toujours égal à celui des vibrations longitudinales elles-mêmes, et qui sont caractérisées par une disposition alterne des lignes nodales dont l'intervalle, sur deux faces opposées, est le même que celui des lignes de repos du mouvement transversal ordinaire qui donnerait le même son. Elles donnent lieu, à l'instant où elles s'établissent, à un mouvement moléculaire qui est toujours parallèle aux faces et aux arêtes des verges, mais qui est de sens contraire de part et d'autre des lignes de repos. Ainsi, quand une verge vibre longitudinalement, elle est le siége, d'abord, d'un mouvement de contraction et d'allongement analogue à celui des colonnes d'air qui résonnent dans des tuyaux ; ensuite, d'un mouvement de flexion transversal analogue à celui qui est produit brusquement dans une verge comprimée dans le sens de sa longueur ; et enfin d'un mouvement moléculaire longitudinal qui est alternativement de sens contraire de part et d'autre de chaque point d'inflexion.

« *Deuxièmement*. Les caractères des systèmes nodaux dépendent particulièrement de la forme des verges, ainsi que du rapport de leurs dimensions transversales entre elles et à la longueur. Ces systèmes sont extrêmement variés, même pour les formes les plus simples, c'est-à-dire lorsque la section des verges est carrée ou circulaire, les seuls cas où l'on puisse en déterminer le nombre et prévoir l'aspect qu'ils peuvent présenter. En général, ces systèmes sont composés de lignes nodales hélicoïdales qui tournent, soit dans le même sens d'un bout à l'autre des verges, soit en sens contraire dans les deux moitiés de la longueur, ou bien ils sont formés de lignes transversales qui ont une disposition alterne sur les faces ou arêtes opposées

des verges, et dont les extrémités tombent perpendiculairement sur deux tiges nodales longitudinales qui occupent deux arêtes diamétralement opposées.

« *Troisièmement*. La comparaison des allongements des verges, par les vibrations longitudinales et par des poids, montre qu'un léger ébranlement moléculaire peut donner lieu à un développement de force qui paraît énorme, eu égard à la cause qui le produit, et qui est d'autant plus extraordinaire, qu'il semble proportionnel à l'aire de la section des verges. »

Pour démontrer les deux premières de ces propositions générales, Savart détermine d'abord par l'expérience les lois des systèmes nodaux que l'on observe dans les vibrations longitudinales des verges, et il constate ainsi que ces systèmes ne peuvent en aucune sorte résulter des vibrations longitudinales elles-mêmes, mais qu'ils résultent d'un *mouvement concomitant*, dont les périodes sont pareilles à celles des vibrations transversales. Ce premier point établi, il se présente une difficulté qui semble d'abord insurmontable : les vibrations transversales étant perpendiculaires à l'axe, si le mouvement concomitant dont il s'agit est de même nature, il devrait faire sauter le sable perpendiculairement à la face des verges, tandis qu'au contraire il le fait glisser tangentiellement, comme ferait une impulsion longitudinale. Mais Savart résout cette difficulté par une série d'expériences extrêmement ingénieuses. Soit *ab* (Pl. 30, Fig. 1) une portion de verge brusquement infléchie d'une petite quantité, la face *ab* s'allonge et la face *cd* se raccourcit; pendant l'allongement les molécules marchent tangentiellement de *a* en *n* et de *b* en *n*; donc le sable se déplace dans le même sens, et il y a en *n* un point de repos, ou une ligne nodale formée par la rencontre de ces deux mouvements opposés du sable : au contraire, pendant le raccourcissement de la face *cd*, les molécules de cette face marchent tangentiellement de *v* en *c* et de *v* en *d*; donc les molécules de sable marcheraient dans le même sens, s'écartant de part et d'autre du point *v*, qui devient ainsi un ventre de vibrations. Que cette portion de verge revienne maintenant à sa position rectiligne sans se courber de l'autre côté, le même effet se produira pendant le retour; par conséquent, si la vibration transversale a peu d'amplitude, et si elle ne s'accomplit que d'un seul côté, le point *n* de la convexité sera essentiellement un nœud, tandis que le point *v* de la con-

Digitized by Google

cavité sera essentiellement un ventre. Ce qui arrive à l'une des portions de la verge arrive nécessairement à toutes les portions contiguës successives éprouvant des flexions analogues et opposées (Fig. 2) : d'où il suit que les nœuds de l'une des faces correspondent aux ventres de l'autre face, et *vice versâ*.

Tel est le principe qui sert de point de départ à Savart; nous y ajouterons quelques développements extraits de son mémoire.

« D'abord il faut observer que les verges libres par les deux bouts, et qui vibrent transversalement, peuvent présenter un nombre pair ou un nombre impair de lignes de repos, et que par conséquent le mouvement longitudinal pourra être isochrone au mouvement transversal qui s'accompagne d'un système nodal de l'une ou de l'autre espèce. Ensuite, comme les intervalles entre les sons qui composent la série des harmoniques des verges libres, vibrant transversalement, sont assez grands, surtout pour les modes de division les plus simples, il pourra aussi se faire que le son longitudinal tombe entre deux sons du mouvement transversal; mais nous ne nous occuperons ici que du cas où l'isochronisme existe naturellement.

« Soit donc (Fig. 3) une verge vibrant transversalement et représentant un nombre impair de nœuds 0, 1, 2....; 0′, 1′, 2′,.... qui se correspondent : comme les nombres des vibrations des verges qui vibrent longitudinalement ne dépendent que de la longueur, et qu'au contraire ceux des vibrations transversales sont influencés par l'épaisseur, il est évident qu'il y aura toujours une épaisseur telle que le mode de division qui est représenté dans la figure sera le résultat d'un nombre de vibrations égal à celui des vibrations longitudinales : or, si l'on supprime les nœuds, 1, 3, 5, 7, sur la face supérieure de la verge, et 0′, 2′, 4′, 6′, 8′, sur la face inférieure, on aura une disposition nodale de cette même verge vibrant longitudinalement (Fig. 4), disposition qu'on rencontre très-souvent. Mais l'expérience montre qu'elle n'est pas la seule qui puisse résulter d'un nombre impair de nœuds, et que les lignes 0, 2, 5, 7 sur la face supérieure, et les lignes 1′, 3′, 6′, 8′, sur la face inférieure, peuvent aussi disparaître; mais alors les nœuds 4 et 4′ (Fig. 6) s'écartent un peu du milieu de la longueur de la verge, de sorte que les intervalles 3, 4, et 4′, 5′ deviennent un peu plus grands que les ventres des vibrations du mouvement transversal. Dans le premier cas, le mode d'inflexion de la verge est très-

Digitized by Google

simple, les parties vibrantes étant toutes d'égale longueur (Fig. 5); dans le second (Fig. 7), il y a, au milieu de la longueur, deux parties vibrantes beaucoup plus courtes que les autres; il semble que les deux moitiés de la verge s'infléchissent indépendamment l'une de l'autre. Mais ce qui se passe au milieu de la longueur n'est qu'une conséquence de ce que, les contractions longitudinales commençant par les extrémités de la verge, il peut arriver qu'elles y produisent des courbures dont le sens soit opposé pour des parties vibrantes également distantes du milieu de la longueur, tandis que dans le mode d'inflexion (Fig. 5), ces courbures se font du même côté de l'axe. L'établissement des deux parties vibrantes du milieu de la longueur étant donc ainsi forcé, on conçoit qu'en ce point le mouvement doit toujours être plus ou moins irrégulier; aussi, les lignes nodales 4, 4′ sont-elles toujours très-mal dessinées et souvent obliques aux arêtes de la verge, au lieu de leur être perpendiculaires comme le sont toutes les autres; il arrive même fréquemment que le sable, au lieu de se mouvoir parallèlement aux arêtes, est entraîné dans des directions obliques ou suivant des courbes plus ou moins irrégulières. Néanmoins, ce mode de division est peut-être celui qui se présente le plus souvent à l'observation.

« Supposons maintenant que la verge, tout en conservant la même longueur, vienne à diminuer un peu d'épaisseur, le son longitudinal restant par conséquent le même, il faudra que le mode de division transversal se modifie; admettons que la diminution soit telle, pour que l'isochronisme des deux mouvements puisse avoir lieu, que la verge, vibrant transversalement, présente un nombre pair de nœuds (Fig. 8) : si l'on efface les nœuds 1, 3, 5, 7, sur la face supérieure, et les nœuds 0′, 2′, 4′, 6′ sur la face inférieure, on aura une disposition nodale de la verge vibrant longitudinalement (Fig. 9), disposition qui se présente fréquemment : si l'on efface au contraire les nœuds 0, 2, 5, 7, sur la face supérieure, et les nœuds 1′, 3′, 4′, 6′ sur la face inférieure, on aura pour mode de division, dans le cas des vibrations longitudinales, la disposition représentée (Fig. 11). Dans le premier cas, le mode d'inflexion de la verge sera très-simple (Fig. 10) : dans le second cas (Fig. 12), il sera plus compliqué; la verge présentera, au milieu de sa longueur, une partie vibrante de moitié plus courte que les autres, et il appa-

raîtra en *m* une ligne où le sable se rassemblera, et à une très-petite distance de laquelle il aura un mouvement en sens contraire pour aller former les nœuds 2′ et 5′. Ce mode d'inflexion se rencontre plus fréquemment que le précédent : comme celui de la figure 7, il est une conséquence de ce que les courbures s'établissent d'abord aux extrémités, et du sens même qu'elles affectent. La comparaison des figures 10 et 12 montre clairement cette influence exercée par le sens des courbures. »

Ainsi les verges à section rectangulaire qui vibrent longitudinalement sont susceptibles d'affecter quatre modes de division bien distincts, savoir : les modes *a* et *a′* (Fig. 4 et 6), qui résultent des vibrations transversales dont le nombre de nœuds est impair, et les modes *b* et *b′* (Fig. 9 et 11), qui résultent au contraire des vibrations transversales dont le nombre des nœuds est pair. Ces quatre modes peuvent se combiner entre eux, et c'est par leurs combinaisons coexistantes que Savart explique les phénomènes si complexes que présentent les verges carrées ou prismatiques, les cylindres, les tubes et les cordes. C'est ainsi, par exemple, que les tubes donnent les lignes nodales très-bizarres de la figure 13, ou les lignes nodales moins discontinues de la figure 14, qui dérivent des premières.

Pour démontrer la troisième proposition générale, que nous avons rapportée plus haut (page 84), Savart a déterminé par des expériences très-précises les allongements que prennent les verges pendant leurs vibrations longitudinales, et il a pu constater ainsi que pour le cuivre, le laiton, l'acier, le fer et le bois, ces allongements se trouvent souvent de 1 dix-millième et demi ou 2 dix-millièmes de la longueur, c'est-à-dire d'environ 2 dixièmes de millimètre pour des verges de 1 mètre, qu'elles soient minces ou épaisses. Or, le poids qui serait nécessaire pour produire par la traction un allongement égal devrait être très-considérable si on l'appliquait seulement à des verges de quelques centimètres de diamètre; il en résulte donc une sorte de paradoxe mécanique, en ce qu'une simple vibration détermine un développement de force prodigieux. Pour s'en rendre compte d'une manière frappante, il suffit de coller avec de la cire un petit tube de verre à une grosse poutre de bois, puis de mettre le tube en vibration en le touchant avec du drap mouillé : à l'instant, toute la masse de la poutre entre en vibration longitudinale, elle s'allonge et se contracte, et il faudrait des poids énormes agissant par traction

ou par compression pour lui faire subir ces changements de dimensions qu'un léger frottement peut lui imprimer.

Dans ce qui précède, nous n'avons parlé que des modes de vibrations qui conviennent aux verges dont les extrémités sont libres, mais il se développe des phénomènes analogues lorsqu'on fixe solidement les deux extrémités ou seulement une seule.

M. Cagniard de La Tour a fait de nombreuses expériences sur les vibrations longitudinales des longs tubes remplis de liquide. Dans ce cas, toute la masse liquide participe aux vibrations des parois; il en résulte par conséquent des dilatations et des contractions moléculaires considérables, qui déterminent des solutions de continuité plus ou moins apparentes. Mais ces phénomènes curieux n'ont pas été soumis à une analyse assez rigoureuse ni assez complète, pour qu'il nous soit possible de résumer ici les résultats des observations. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. LVI.)

40. Vibrations des corps dont une seule dimension est petite par rapport aux deux autres. Plaques, membranes, cloches, etc. — Pour faire vibrer les plaques, on peut employer la pince de la figure 2, planche 31, après l'avoir fixée très-solidement sur un établi; la plaque *p* (Fig. 4 et suivantes) est saisie entre le cylindre *a* et la vis *b*, qui se terminent l'un et l'autre par un morceau conique de liége ou de peau de buffle; lorsqu'elle est assez fortement pressée, on l'ébranle avec un archet, et l'on en tire des sons purs, dont il est facile de prendre l'unisson sur un piano.

En procédant de la sorte, on constate d'abord ce premier résultat général, que, quelle que soit la substance de la plaque, bois, terre cuite, verre, métal, etc.; quelle que soit sa forme, carrée, triangulaire, ronde, elliptique, etc., on peut toujours en obtenir des sons extrêmement variés, montant du grave à l'aigu par des nuances plus ou moins rapprochées. On constate pareillement ce second résultat, que, pour chacun des sons qu'elle rend, la plaque se partage en *parties vibrantes* et en *lignes de repos* ou *lignes nodales* offrant un arrangement particulier, avec cette circonstance remarquable qu'à mesure que le son s'élève, l'étendue des parties vibrantes devient plus petite, et par conséquent les lignes nodales plus multipliées.

Pour démontrer ce point essentiel, on saupoudre la surface supérieure de la plaque avec du sable sec et fin : alors au premier son qui est produit, le sable entre en mouvement, il saute et retombe plusieurs fois en une seconde, et, toujours repoussé

Digitized by Google

par les parties vibrantes, il va s'accumuler sur les parties immobiles, et marque ainsi la trace des lignes nodales. Savart a imaginé un moyen bien ingénieux de relever d'une manière parfaitement correcte ces figures qu'il serait souvent impossible de copier au crayon, tant elles sont complexes et bizarres : pour cela, au lieu de sable, il emploie des pains de tournesol, pulvérisés avec de la gomme, puis réduits en pâte, séchés, pulvérisés de nouveau et passés au tamis, afin d'avoir des grains égaux et de grosseur convenable. Lorsque cette poudre colorée et hygrométrique a tracé sur une plaque les lignes nodales correspondantes à un son connu, il suffit d'appliquer sur la plaque une feuille de papier légèrement humectée avec de l'eau gommée, et d'exercer ensuite une pression suffisante pour imprimer sur le papier la figure que portait la plaque. C'est ainsi que Savart est parvenu en même temps à noter plusieurs centaines de sons produits par une même plaque, et à recueillir, pour les comparer entre elles, toutes les figures correspondantes à ces sons.

Plaques carrées. — La figure 1 (Pl. 31) représente, par exemple, 70 figures, produites par une même plaque carrée; ces figures sont arrangées dans un ordre méthodique dont nous allons indiquer la clef. Le chiffre qui est à gauche du trait, au-dessus de chaque figure, marque le nombre des lignes nodales horizontales, et celui qui est à droite le nombre des lignes nodales verticales; les lignes réelles, comme on peut le voir, ne sont pas continues, elles sont plus ou moins contournées, mais elles peuvent toujours se ramener aux directions horizontales et verticales. Nous devons remarquer encore que les diagonales sont prises pour des lignes verticales, dont elles s'approchent en se décomposant. Les chiffres qui sont en tête de chaque série indiquent la différence entre le nombre des lignes horizontales et le nombre des lignes verticales; ainsi le chiffre 3, qui est en tête de la cinquième série, annonce que dans toute cette série les lignes nodales verticales excèdent de 3 les lignes nodales horizontales. Savart fait remarquer encore que quand le nombre de ces dernières est la moitié des premières, il y a de petits cercles enfermés dans un carré situé diagonalement, comme on le voit pour $\frac{2}{4}$, $\frac{3}{6}$, $\frac{4}{8}$, $\frac{5}{10}$; et que, quand il est le tiers, les petits cercles sont dans des carrés droits comme $\frac{2}{6}$, $\frac{3}{9}$.

Outre ces figures de la plaque carrée, Savart en a relevé beaucoup d'autres qui correspondent à des sons intermédiaires;

ces figures, comme on le suppose, ne s'obtiennent pas, sans fixer sur la plaque plusieurs points qui doivent appartenir à des lignes nodales (voy. les supports, Fig. 3 pour les plaques carrées et Fig. 11 pour les plaques rondes).

Chladni avait pensé que si l'on considère seulement les figures qui ont un même nombre de lignes nodales, verticales et horizontales, les nombres des vibrations correspondants sont entre eux comme les carrés des lignes nodales : mais Savart a fait voir que cette loi donne toujours des nombres de vibrations trop petits ou des sons trop graves, et que l'erreur est d'autant plus grande que le nombre des lignes nodales est plus considérable. Ainsi l'erreur est très-grande pour le son qui correspond à 15 lignes nodales verticales et 15 horizontales.

Les plaques triangulaires, rectangulaires et polygonales, donnent des figures analogues aux précédentes, mais dans lesquelles on ne retrouve pas l'espèce de symétrie binaire des plaques carrées.

Plaques circulaires.— Une plaque circulaire donne aussi une multitude de sons, à chacun desquels appartient une figure déterminée; mais l'ensemble de ces figures peut être rapporté à trois systèmes différents, savoir le *système diamétral*, le *système concentrique* et le *système composé*.

Le *système diamétral* est uniquement composé de diamètres qui divisent la circonférence en un nombre pair de parties égales : dans la figure la plus facile à obtenir, on compte 2 diamètres, et 4 parties dans la circonférence (Fig. 4); ensuite 3 diamètres et 6 parties, etc.

Dans les cercles de métal qui ont 3 ou 4 décimètres de diamètre, on peut souvent compter jusqu'à 36 ou 40 parties dans la circonférence. Il est facile de voir pourquoi, dans ce mode de division par lignes droites, les parties doivent être toujours égales et en nombre pair : car, 1° il est évident que toutes ces parties doivent vibrer à l'unisson, c'est-à-dire, accomplir dans le même temps le même nombre d'oscillations; et, puisqu'elles sont disposées de la même manière, il faut bien qu'elles soient égales en étendue; 2° deux parties contiguës doivent avoir des mouvements opposés de part et d'autre de la ligne nodale, c'est-à-dire, que l'une doit passer à droite de sa position primitive, tandis que l'autre passe à gauche, et *vice versâ*; ce qui ne pourrait avoir lieu si les parties étaient en nombre impair.

Digitized by Google

Dans le *système concentrique*, toutes les lignes nodales sont des circonférences dont le centre est au centre de la plaque.

Le cas le plus simple est celui d'une seule ligne nodale (Fig. 5); ensuite on peut en obtenir deux, trois ou davantage. Pour reproduire ces figures plus facilement, Savart prend comme Chladni des plaques d'un grand diamètre, mais il les perce au centre d'un trou circulaire de 4 ou 5 millimètres de diamètre; dans ce trou, il fait passer une mèche de crin en guise d'archet (Fig. 6); la plaque doit être soutenue seulement par quelques points des lignes nodales que l'on veut produire.

Dans le *système composé*, les lignes nodales sont des diamètres plus ou moins courbés et des circonférences plus ou moins altérées dans leurs contours. Les figures 7 et 8 représentent quelques-unes des formes nombreuses auxquelles on peut arriver. Pour les obtenir, il faut plus ou moins d'habileté; mais le principe consiste à presser avec les doigts un ou plusieurs des points par lesquels les lignes nodales doivent passer.

Savart a fait une étude complète de ces figures, nous sommes forcé de renvoyer à l'extrait de son mémoire (*Ann. de Chim. et de Phys.*, 1840, t. LXXII, p. 254); nous nous bornerons à remarquer que, dans le système diamétral, les rayons cessent de se prolonger jusqu'au centre dès que leur nombre devient un peu grand, et alors les parties centrales de la plaque produisent, en général, des sons harmoniques, c'est-à-dire les sons 2, 3 et 4, en prenant 1 pour le son produit par les parties de la plaque qui avoisinent la circonférence. La figure 10 suffirait pour indiquer combien il serait facile de se tromper sur la direction des lignes nodales, si l'on n'avait pas un moyen très-précis de les imprimer au moment où elles se produisent.

Le déplacement des lignes nodales est un phénomène très-remarquable que l'on doit encore à la rare sagacité de Savart. Voici en quoi il consiste : si l'on prend un disque de laiton très-bien travaillé, d'environ 4 décimètres de diamètre et de 2 ou 3 millimètres d'épaisseur, qu'on le dispose comme il est représenté dans la figure 9, et qu'on l'ébranle par le bord, avec un archet, après avoir jeté sur sa surface de la poudre de lycopode qui est beaucoup plus légère que le sable, on observe bientôt que, pour certains sons graves et pleins qui correspondent à une figure diamétrale de 4, 6 ou 8 rayons, ces lignes nodales ne restent pas fixes; elles éprouvent un mouvement d'oscillation très-marqué, et

même, en continuant le mouvement de l'archet, on parvient à les faire tourner d'un mouvement de rotation continu, en sorte que la poudre de lycopode forme alors un tourbillon rapide qui parcourt la surface du disque à une certaine distance de la circonférence et en lui restant parallèle. Cette expérience est l'une des plus intéressantes que l'on puisse faire avec les plaques circulaires. Savart explique ce phénomène de la manière suivante : dans les disques les mieux travaillés, l'élasticité n'est pas la même dans tous les sens ; il y a deux diamètres qui correspondent, l'un à la moindre élasticité, et l'autre à la plus grande; cela posé, si l'on ébranle le disque avec l'archet en attaquant un point tel que les lignes nodales tendent à se placer sur ces diamètres, les lignes nodales seront immobiles; mais, si l'on attaque un autre point, les flexions que l'archet produit sur les bords du disque étant dissymétriques, les lignes nodales qui se forment tendent alors à revenir à leur première position, et pour cela elles oscillent de part et d'autre de cette position; ou bien elles se mettent à tourner d'un mouvement continu, quand les excursions très-grandes du disque leur donnent assez d'amplitude pour qu'elles puissent franchir leur lieu de repos.

Plaques dont la forme est un polygone régulier. — Dans son beau travail cité plus haut (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. LXXIII), Savart résume ainsi l'ensemble des expériences qu'il a faites sur ce sujet :

1° Les figures acoustiques des polygones réguliers sont de deux ordres : les unes sont simples, et les autres composées;

2° Les figures simples ou génératrices sont formées, les unes de lignes parallèles aux directions de la plus grande résistance à la flexion, les autres de lignes parallèles aux directions de moindre résistance à la flexion;

3° Les figures composées se forment de la réunion de deux figures génératrices, sans addition de lignes nodales étrangères : elles se composent donc de deux systèmes de lignes de repos, les unes qui sont parallèles à la direction de plus grande résistance, les autres à la direction de moindre résistance à la flexion;

4° Enfin, les figures acoutisques d'un même polygone peuvent être coordonnées en un tableau à double entrée dans lequel chaque figure, si compliquée qu'on la suppose, a sa place déterminée, place qui indique sa composition.

Cloches. — Les cloches exécutent en général des vibrations

Digitized by Google

perpendiculaires comme les plaques, et se partagent aussi en diverses parties séparées par des lignes nodales, dont la trace peut être extrêmement irrégulière. Pour prendre une idée de ces lignes nodales, il suffit de mettre de l'eau ou du mercure dans une cloche ou dans un grand verre à pied, et d'en ébranler le bord avec un archet; alors, on verra distinctement la surface liquide se partager; par exemple, comme dans les figures 12 et 13, où il y a 2 diamètres perpendiculaires dont les extrémités correspondent à 4 lignes nodales parfaitement marquées. On peut constater aussi que ces lignes nodales se déplacent comme dans les plaques circulaires.

Membranes. — Les membranes présentent des modes de vibration qui ne sont pas sans analogie avec ceux des plaques solides; on peut s'en assurer avec du papier ou du parchemin, ou, ce qui vaut mieux encore, avec de la baudruche très-souple et très-égale; seulement, il faut employer un moyen particulier pour tendre et pour ébranler ces espèces de plaques trop minces pour se soutenir d'elles-mêmes. Savart, qui a fait une étude particulière de ces phénomènes, fixe les membranes par leurs bords, en les collant sur des cadres de bois ou sur l'ouverture d'une cloche de verre; il les humecte plus ou moins pour leur donner des tensions plus ou moins grandes; ensuite, pour les ébranler, il en approche à quelque distance un timbre vibrant, ou un tuyau d'orgue dont le son est plein et soutenu : dès que le son se fait entendre, la membrane vibre comme si elle était directement ébranlée; les grains de sable qui la recouvrent sautillent sur sa surface et s'accumulent sur les points de repos pour y dessiner les lignes nodales. Les figures que l'on obtient sont extrêmement variées, elles dépendent de la tension de la membrane et de l'acuité du son qui la frappe.

Savart a essayé d'analyser la série des figures que peut donner une membrane ébranlée comme nous venons de le dire, et nous allons rapporter ici les observations qu'il a faites sur ce sujet intéressant (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXII, p. 386) :

« Pour plus de simplicité, je supposerai toujours qu'on ait d'abord obtenu une figure composée de lignes nodales rectilignes qui se coupent rectangulairement, et j'examinerai par quel chemin cette figure peut passer à une autre, composée simplement de lignes parallèles.

« Par exemple, je suppose qu'on soit parvenu à produire le

Digitized by Google

mode de division représenté par le n° 1 de la figure 14; si la tension de la membrane est constante et que le son devienne un peu plus aigu, il pourra arriver que les angles opposés au sommet en *aa'*, *bb'*, *cc'*, *dd'*, se désunissent comme dans le n° 2, qui prendra peu à peu l'aspect des n^{os} 3, 4 et 5, si le son monte toujours; et ensuite celui du n° 6, composé seulement de 4 lignes parallèles; mais ce moyen de passer du premier mode de division à celui du n° 6, par cette première espèce de séparation des angles, n'est pas le seul que puisse employer la membrane; les figures 15 et 16 présentent des exemples de transformations différentes par lesquelles elle peut encore parvenir au même but de 4 lignes parallèles. Il peut aussi arriver (Fig. 17), que les angles opposés en *aa'*, *bb'*, *cc'*, *dd'*, soient ceux qui se divisent d'abord, et que la figure tracée par le sable prenne successivement l'aspect des n^{os} 2, 3, 4, 5 et 6; ou bien que cette division ait lieu comme dans le n° 2 des figures 18 et 19, ce qui produira encore de nouvelles modifications dans les figures successives qui conduiront à 4 lignes parallèles. Enfin, il pourra même se faire que les angles opposés ne se divisent pas, comme dans le n° 2 de la figure 20, qui passe au n° 6 par de simples inflexions des lignes droites en sens contraire.

« Maintenant, 4 lignes parallèles peuvent passer à d'autres nombres de lignes parallèles ou dirigées rectangulairement : la figure 21 présente une transformation de ce mode de division à deux lignes nodales parallèles, et la figure 22 un passage du même mode de division à quatre lignes également parallèles, coupées rectangulairement par quatre autres.

« En général, quand on part d'une figure composée de lignes qui se coupent rectangulairement, le caractère des modifications successives dépend de la manière dont les angles opposés au sommet se désunissent : c'est ce qu'on peut voir d'une manière fort nette dans les figures 23 et 24, qui sont des passages de quatre lignes parallèles. Au contraire, si l'on part des lignes parallèles, on peut dire en général que le caractère des modifications dépend des inflexions diverses que ces lignes peuvent affecter. C'est ainsi que, dans les mêmes figures 23 et 24, les n^{os} 5, considérés comme première modification des lignes droites, doivent produire des phénomènes tout différents, dépendant de ce que dans l'un les lignes se courbent d'abord en dehors, tandis que dans l'autre elles se courbent en dedans. Mais, de toutes les modifications aux-

Digitized by Google

quelles les lignes droites peuvent donner naissance, il n'en est point qui offrent des phénomènes plus singuliers que ceux qui résultent des inflexions alternatives que ces lignes peuvent d'abord prendre, selon qu'il se présente deux courbures dans un sens et une dans l'autre, etc., ou trois dans un sens et deux dans l'autre. On en voit des exemples remarquables (Fig. 25 et 26).

« Il résulte donc de ces observations, non-seulement que les membranes carrées sont susceptibles de produire tous les nombres possibles de vibrations, et que pour chacun de ces nombres elles se divisent d'une manière particulière, mais encore qu'un même nombre de vibrations peut être donné par plusieurs modes de division. Quant aux membranes dont les contours sont différents, circulaires, triangulaires, etc., elles présentent des phénomènes analogues, quoique plus compliqués. C'est ainsi, par exemple, que dans une membrane circulaire (Fig. 27), trois lignes diamétrales peuvent passer graduellement à trois lignes parallèles, et ensuite à une seule diamétrale accompagnée d'une ligne circulaire; que cinq diamétrales peuvent passer à cinq lignes parallèles, et de là à d'autres modes de division; par exemple, à deux lignes circulaires divisées par une seule diamétrale.

« Les transformations successives des lignes nodales sont beaucoup plus difficiles à observer sur les lames rigides que sur les membranes, parce que, comme on ne peut produire des modes de division donnés qu'en rendant immobiles plusieurs points de la surface de ces corps, il arrive presque toujours que ces points appartiennent en même temps à un ou plusieurs autres systèmes de lignes nodales, de sorte qu'on tombe souvent d'un son très-grave à un son très-aigu, et réciproquement, sans pouvoir passer par les intermédiaires. »

Ces résultats remarquables ne peuvent pas être sans influence sur les phénomènes de l'audition, puisque la membrane du tympan est analogue à celles que Savart a soumises à l'expérience. J'ajouterai encore ici cette autre observation de Savart : il pensait que les membranes, produisant sans doute des sons harmoniques, comme les plaques circulaires, par les vibrations de leurs parties centrales, il est très-probable qu'en écoutant un instrument qui ne produit qu'un seul son, il nous arrive cependant d'entendre à la fois ce son solitaire et ses harmoniques, ceux-ci prenant naissance dans notre organe lui-même à cause de sa constitution.

41. Effets de l'air sur la forme des lignes nodales. — M. Faraday avait remarqué que les lignes nodales que l'on obtient dans le vide n'ont pas toujours exactement la même apparence que celles que l'on obtient dans l'air, surtout lorsqu'on emploie la poudre de lycopode. Savart a confirmé ces résultats par plusieurs expériences décisives, et en même temps il a assigné la véritable cause de cette différence. Il a constaté qu'une plaque quelconque d'une certaine largeur ne peut pas vibrer dans l'air, sans qu'il se forme, de part et d'autre des lignes nodales, de petits tourbillons très-singuliers qui emportent les poussières légères et qui les déposent au point où ils se joignent et où leur vitesse tend à les presser sur la plaque. Par exemple, si l'on plonge dans l'eau l'extrémité d'une lame large qui vibre de manière qu'il y ait une ligne nodale dans le milieu de sa longueur, on voit distinctement, par les poussières flottantes au milieu de l'eau, un double tourbillon représenté dans la figure 28. Or, ce qui se produit dans l'eau se produit aussi dans l'air, et l'on comprend qu'au croisement des lignes nodales ces tourbillons contraires se modifiant l'un l'autre, il doit en résulter, au moins en apparence, tantôt des points, tantôt des lignes de repos supplémentaires, où la poussière légère se dépose, bien qu'en réalité il se produise des vibrations sous ces dépôts trompeurs; ce sont ces points et ces lignes supplémentaires qui disparaissent en effet dans le vide.

42. Vibrations des corps qui n'ont pas la même élasticité dans tous les sens. — Savart a publié sur ce sujet deux mémoires extrêmement intéressants (*Annal. de Chim. et de Phys.*, t. XL) dont nous ne pouvons donner ici qu'une analyse succincte.

Savart remarque d'abord que, si l'on fait vibrer une plaque elliptique homogène, de verre ou de métal (Pl. 30, Fig. 22), le système de deux lignes diamétrales perpendiculaires se place inévitablement suivant les directions du grand axe aa' et du petit axe bb', et que, si l'on veut à toute force déplacer ce système en ébranlant l'une des extrémités de ces axes, il se déplace en effet, mais non pas sans s'altérer, car il se change en une espèce d'hyperbole hh' et yy' dont le premier axe est dirigé suivant le grand axe de l'ellipse; alors le son est plus grave.

Il faut un plus grand effort pour plier l'ellipse suivant aa' que suivant bb'; ainsi le premier axe de l'hyperbole est dirigé suivant la plus grande résistance à la flexion.

Digitized by Google

Une plaque circulaire de laiton présente des phénomènes analogues lorsqu'on a diminué son élasticité dans un sens par plusieurs traits de scie parallèles qui ont enlevé seulement une partie de son épaisseur. Dans cet état, le système des deux lignes diamétrales perpendiculaires ne peut plus tourner autour de son centre; l'une des lignes qui le composent reste fixée dans la direction parallèle aux traits de scie, et l'autre perpendiculairement; mais, si l'on ébranle ces points, il se déforme et devient une hyperbole dont le premier axe est encore dirigé suivant la plus grande résistance à la flexion.

Pour étudier ensuite les phénomènes que présentent les plaques dont l'élasticité varie graduellement dans des sens perpendiculaires, ou dans des sens différents, Savart a taillé un grand nombre de plaques circulaires de bois ayant leurs faces parallèles plus ou moins inclinées soit au plan des fibres, soit aux fibres elles-mêmes. Supposons par exemple que *cc'* (Pl. 30, Fig. 23) représente un cube de bois de hêtre, dont la surface *p* soit parallèle au plan des fibres, la face *t* perpendiculaire à leur tranche, et la face *b* perpendiculaire à leur bout. Si l'on a plusieurs cubes pareils, tirés de la même pièce de hêtre, tous sans défaut, et parfaitement homogènes entre eux, on en pourra tirer des plaques de même épaisseur et de même rayon, qu'il sera permis ensuite de comparer comme si elles sortaient du même cube : les unes seront coupées perpendiculairement à la face *p*, dans les directions *pm*, *pm'*, *pd*, et dans les directions intermédiaires; les autres perpendiculairement à la face *t*, aussi dans les directions *tm*, *tm''*, *td*, etc.; les autres enfin perpendiculairement à la face *b*, et aussi suivant les directions *bm'*, *bm''*, *bd*, etc. En faisant vibrer toutes ces lames, mais seulement pour obtenir le système des lignes nodales diamétrales perpendiculaires, ou le système des deux branches hyperboliques, Savart a trouvé des rapports remarquables entre les positions de ces systèmes et les directions des différents axes d'élasticité du bois de hêtre. Il a reconnu que les nombres de vibrations ne sont liés qu'indirectement avec les modes de division, car deux figures nodales semblables peuvent résulter de sons différents, et réciproquement un même son peut résulter de deux figures nodales différentes. Enfin, dans ces plaques hétérogènes, tous les modes de division sont doubles; c'est-à-dire, que chaque mode de division, considéré en particulier, peut toujours, en subis-

Digitized by Google

sant toutefois des altérations plus ou moins considérables, s'établir en deux positions déterminées.

En faisant vibrer trois petites verges prismatiques à bases carrées, qui avaient été taillées dans des cubes pareils aux précédents et suivant les directions *dc'*, *df*, et *dr*, Savart a déduit des sons donnés par ces verges le rapport des résistances que le bois de hêtre oppose à la flexion dans ces trois sens rectangulaires. Il trouve qu'en représentant par l'unité la résistance à la flexion suivant *dc'*, cette résistance est 2,25 suivant *dr*, et 16 suivant *df*.

Savart a soumis le cristal de roche à des recherches analogues. On sait que cette substance se présente assez ordinairement dans la nature sous la forme d'un prisme hexaèdre terminé par deux pyramides (Fig. 24); la ligne *ss'* qui joint les deux sommets de la pyramide est l'axe du cristal. Or, dans les plaques perpendiculaires à cet axe, le système des deux lignes nodales diamétrales perpendiculaires (Fig. 25) pouvant en général tourner autour du centre, sans altération sensible, il en résulte que l'élasticité est à peu près la même suivant tous les rayons.

Les plaques taillées parallèlement à l'axe n'ont pas toutes la même élasticité : celles qui passent par l'axe et par un des rayons de la coupe *abcdef* du prisme (Fig. 26) donnent les lignes nodales perpendiculaires ou le système hyperbolique (Fig. 27), tandis que celles qui passent par l'axe et par l'apothème *op* de la section précédente, ne peuvent offrir que deux systèmes hyperboliques à peu près semblables, mais correspondants néanmoins à des sons différents (Fig. 28). Les axes de ces hyperboles semblent faire entre eux un angle de 51 ou 52°.

D'autres plaques taillées dans des directions différentes donnent encore des résultats différents, et Savart était porté à conclure, de l'ensemble de ces expériences, que le cristal de roche paraît avoir trois systèmes d'élasticité, chacun représenté par trois lignes. Il avait même essayé, par des considérations ingénieuses, de déduire leurs directions; mais nous ne pouvons entrer ici ni dans tous ces détails, ni dans la discussion qui devrait les accompagner.

43. Vibrations des corps dont aucune dimension n'est petite par rapport aux autres. — Il résulte évidemment de tout ce qui précède que des masses solides quelconques peuvent entrer

en vibration comme les verges, ou les lames, ou les membranes, et que pendant leurs mouvements elles se partagent en diverses parties vibrantes, séparées les unes des autres par des *surfaces nodales* plus ou moins irrégulières. Ainsi, lorsqu'un bloc de bois, de pierre ou de fer, retentit sous le choc du marteau, on peut suivre par la pensée les pressions qui se communiquent de proche en proche dans toutes les directions, depuis la première molécule qui reçoit le coup jusqu'aux molécules qui en sont le plus éloignées, et cette diffusion du mouvement se fait comme dans une colonne d'air, c'est-à-dire par ondes condensées ou raréfiées; seulement, les ondes sont d'autant plus courtes que la matière est moins compressible. Mais, pour ébranler des masses un peu considérables et en faire sortir des sons purs et soutenus, on éprouve toujours de grandes difficultés, et c'est sans doute pour cette raison que l'on n'a fait jusqu'à présent que très-peu d'expériences sur ce sujet. Les masses de différentes substances et de différentes formes offriraient cependant des modes de division et des traces de lignes nodales qui seraient, sans doute, le moyen le plus efficace d'étudier leur structure intérieure et tous les accidents de leur élasticité.

44. **Des vibrations des corps dans différents milieux.** — Les corps peuvent vibrer dans les différents fluides élastiques, et même dans les différents liquides, comme ils vibrent dans l'air; mais l'on conçoit que l'inertie et la résistance du milieu ambiant doivent exercer une influence sur la rapidité des vibrations, et par conséquent sur leur nombre et sur le ton du son qui en résulte. Cette influence est d'autant plus grande que la masse fluide que le corps solide doit déplacer dans ses mouvements est elle-même plus considérable. Ainsi les vibrations perpendiculaires à la surface de jonction d'un solide et d'un liquide seront beaucoup plus modifiées que les vibrations tangentes à cette surface. Savart a reconnu, par exemple, qu'un disque de verre, ébranlé par un petit tube fixé à son centre et perpendiculairement à sa surface, donne dans l'eau un son plus grave que dans l'air; les lignes nodales concentriques que l'on observe alors ne restent pas non plus les mêmes : dans l'eau, elles s'éloignent du centre. Ce phénomène, qui est très-marqué lorsqu'on passe de l'air dans l'eau, doit se produire encore, mais avec moins d'intensité, lorsqu'on fait vibrer le même corps suc-

Digitized by Google

cessivement dans des fluides élastiques différents par leur nature ou seulement par leur densité.

Les différences sont bien moindres dans les vibrations tangentielles; ainsi, une lame ou une verge qui vibre dans sa longueur rend sensiblement le même son, soit qu'elle se trouve plongée dans l'air, dans l'eau, ou même dans le mercure.

CHAPITRE IV.

Du mouvement de vibration des masses fluides et de la vitesse du son dans les différents milieux.

45. Divers moyens d'exciter les vibrations sonores dans les gaz. — Nous avons déjà vu comment des vibrations peuvent être excitées dans l'air par l'explosion d'une poudre fulminante, par la percussion d'une masse élastique, comme un timbre, une cloche ou un tam-tam, et par les oscillations rapides des cordes, des verges ou des plaques. Nous avons aussi indiqué comment la lame mince d'air qui vient se briser contre le biseau du tuyau d'orgue détermine une oscillation dans toute la colonne d'air adjacente : le changement de pression qui survient en un point de cette colonne élastique se communique rapidement dans toute son étendue, tous les ressorts moléculaires réagissent les uns sur les autres, et la colonne vibre dans son ensemble, par la même raison qu'un cylindre solide vibre dans toute sa masse quand il est ébranlé dans un point quelconque.

C'est encore le même phénomène qui se produit dans la flûte et dans la toupie d'Allemagne, avec cette seule différence que dans le premier cas l'air est poussé contre le bord de l'ouverture, tandis que dans le second cas c'est l'ouverture elle-même qui est poussée contre l'air par la rotation de l'instrument.

Dans les appeaux ou les réclames dont se servent les chasseurs pour imiter le cri des oiseaux (Pl. 29, Fig. 34 et 35), le phénomène paraît un peu plus compliqué. Les vibrations sont encore produites par le courant d'air, mais ici le courant entraîne dans son mouvement une partie du fluide qui est contenu dans la cavité de l'appareil, et le fluide ainsi raréfié n'étant plus capable de soutenir la pression atmosphérique, l'air extérieur rentre, et rentre en excès ; alors, nouvelle raréfaction produite par l'entraînement du courant, et nouvelle rentrée déterminée par la pression extérieure, etc. Ainsi toute la masse d'air de la cavité, alternativement raréfiée et comprimée, accomplit des oscillations qui se communiquent au dehors.

C'est par un jeu semblable que Savart explique les sons aigus

et variés que l'on peut produire en sifflant avec la bouche. Les lèvres avancées et un peu pressées forment en quelque sorte la calotte du réclame (Fig. 34), et les vibrations sont produites parce que l'air est alternativement raréfié par le courant et comprimé par la pression extérieure. Une preuve que les phénomènes se passent ainsi, c'est que l'on peut imiter les sons du sifflet en soufflant simplement dans un tube de verre fermé en partie vers une de ses extrémités par un disque de liége au centre duquel on laisse une ouverture circulaire (Fig. 36).

On peut déterminer encore les vibrations dans les tuyaux par deux autres moyens dont s'est servi M. Wertheim (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXI, ann. 1851), par le mouvement de va-et-vient d'une sorte de piston, et par le mouvement continu d'une lame d'air indépendante. Dans le premier cas, le piston se compose d'une tige mince, mobile dans des guides, suivant l'axe du tuyau, cette tige portant un disque léger, moins large que le tuyau, et qui oscille devant son extrémité entièrement libre et ouverte. Le mouvement d'oscillation est imprimé à ce piston par la pièce de contact d'un électro-aimant, et il doit être réglé d'après le nombre des vibrations que peut recevoir la colonne de gaz, soit que le tuyau soit à l'autre bout, ouvert ou fermé. C'est un procédé ingénieux pour faire vibrer les différents gaz, à des pressions différentes; car il suffit pour cela de les enfermer dans un réservoir convenable, qui contient aussi l'électro-aimant et tout le mécanisme, et d'employer un tuyau fermé par un bout, pénétrant assez avant dans le réservoir, pour que son extrémité ouverte vienne se fixer en présence du piston vibrant. Dans le second cas, un long tube flexible de gutta-percha, communiquant à un réservoir d'air comprimé, se termine par un robinet et par un tube de cuivre aplati; quand on ouvre plus ou moins le robinet, l'air s'échappe par cette fente avec plus ou moins de vitesse, et il suffit alors de présenter cette lame d'air dans une direction convenable, devant l'extrémité d'un tuyau, tout ouverte, ou en partie fermée, pour obtenir des sons remarquables par leur force et leur régularité.

La lampe à gaz hydrogène, que l'on appelle aussi *lampe philosophique*, détermine encore dans l'air un autre mode d'ébranlement. Cet appareil fut imaginé en Allemagne et ensuite étudié par Brugnatelli et Pictet; mais c'est, je crois, de La Rive, de Genève, qui a le premier analysé les phénomènes qu'il présente

Digitized by Google

(*Journ. de Physiq.*, t. LVI, p. 165). L'hydrogène étant allumé à l'extrémité du tube effilé de verre *t* (Pl. 29, Fig. 30), on approche un autre tube long et large *ab* dans la position marquée par la figure, et l'on entend un son très-intense. La vapeur d'eau formée par la combustion se condense rapidement, et détermine ainsi, à quelque distance de la flamme, une raréfaction ou une espèce de vide dans lequel l'air environnant se précipite, et le même phénomène se répétant avec une excessive rapidité, on conçoit qu'il en doive résulter un son dont l'intensité et la gravité dépendent du volume de la flamme et des dimensions du tuyau qui l'enveloppe.

Enfin, l'on peut dans une masse d'air déterminée exciter des sons *par communication*, c'est-à-dire par le moyen d'un autre son qui est produit à quelque distance. Tout le monde sait que certains sons de la voix se renflent et prennent beaucoup d'intensité lorsqu'on les forme devant un vase ouvert ayant une grandeur convenable : alors l'air du vase vibre, et vibre à l'unisson avec la voix à laquelle il donne tant de force et d'éclat ; et, comme une même masse d'air prend plusieurs modes de vibration, il suffira, pour la faire vibrer par communication, de produire à une petite distance l'un des sons qu'elle peut rendre. Mais, pour donner à ce phénomène plus de régularité, Savart a imaginé d'ajuster ensemble deux tuyaux d'un grand diamètre qui glissent l'un sur l'autre comme des tuyaux de lunette : ils peuvent être tout à fait ouverts aux deux bouts, ou bien avoir un bout ouvert et l'autre fermé. Par ce moyen on peut faire varier à volonté la colonne résonnante, et par conséquent la rendre propre à renforcer le son que l'on produit à son extrémité ouverte avec un timbre, une cloche, ou seulement une lame vibrante. Les sons résultants ont une force et une rondeur qui étonnent toujours quand on les entend pour la première fois. L'appareil de Savart est représenté (Pl. 30, Fig. 29) ; le grand timbre *t* est ébranlé avec un archet.

Sur les théâtres des anciens il y avait des *vases renforçants* disposés avec art autour de l'acteur, et destinés à donner plus d'éclat aux vibrations de sa voix.

46. **Les parois qui enveloppent une masse d'air ont une influence sur ses vibrations.** — L'on sait depuis longtemps, par des expériences souvent répétées, que le son du cor et de la trompette dépend de la matière de l'instrument et du degré

Digitized by Google

d'écrouissage qu'elle a reçu. Un cor, par exemple, qui serait recuit au feu, sans être altéré dans sa forme, ne rendrait plus que des sons étouffés. Les facteurs d'orgues connaissent aussi cette influence de la matière des tuyaux sur les qualités des sons, et ils assurent que, pour faire un mauvais instrument, il suffirait d'altérer très-peu la composition d'étain qu'ils emploient dans les jeux de métal, ou la nature du bois dans les jeux de bois. Ces observations sont pleinement confirmées par les nombreuses expériences que Savart a faites avec des tuyaux de parchemin plus ou moins tendu ou de papier plus ou moins humide. Savart a constaté : 1° que dans un tuyau prismatique carré, ayant 30 centimètres de hauteur et 2 centimètres de côté, le son peut baisser de plus d'une octave quand on humecte de plus en plus le papier qui forme les parois ; ce papier est collé sur les arêtes solides du prisme comme sur une espèce de cadre ; 2° que le son peut par ce moyen s'abaisser d'autant plus que les tuyaux sont plus courts : ainsi, il s'abaisse facilement de plus de deux octaves dans les tuyaux cubiques ; 3° qu'il suffit même de faire en papier ou en parchemin une partie seulement de la paroi d'un tuyau pour en faire sensiblement baisser le ton. Nous nous contentons d'énoncer ici ces résultats, car il est facile de voir comment on peut les reproduire par l'expérience.

47. Des changements que peut recevoir le son d'un tuyau, soit par les obstacles qu'on oppose à l'air, soit par les modifications de l'embouchure. — Après avoir donné les lois générales que suivent les sons rendus par les tuyaux (33), nous devons examiner les diverses causes qui troublent ces lois si simples et qui empêchent qu'elles ne se réalisent, par l'expérience, avec toute la rigueur mathématique que d'abord nous avons dû admettre.

Effet des obstacles à l'extrémité des tuyaux ouverts. — Un tuyau ouvert étant en vibration, soit qu'il produise le son fondamental ou l'un des harmoniques supérieurs, il suffit d'approcher de son extrémité ouverte, la main, une feuille de papier, un obstacle quelconque, pour qu'à l'instant le son devienne plus grave, et s'abaisse de plus en plus, à mesure que l'obstacle approche. Ce phénomène est mis à profit pour accorder l'orgue ; on dispose une mince lame de plomb *m* (Pl. 29, Fig. 23) au bout du tuyau, et on l'incline un peu moins ou un peu plus pour faire monter ou descendre le son. C'est par là aussi qu'on

Digitized by Google

détermine le *battement* entre deux tuyaux pareils, qui donneraient exactement l'unisson s'il n'y avait pas d'obstacle.

Ouverture et largeur de la bouche. — En ouvrant la bouche d'un tuyau, c'est-à-dire en relevant la lèvre supérieure, on lui donne une tendance à produire le son fondamental; au contraire, en diminuant l'ouverture ou en serrant les lèvres on le fait octavier; en même temps le son fondamental lui-même s'élève ou s'abaisse sensiblement. La largeur de la bouche a une influence encore plus marquée : si, par exemple, deux tuyaux de bois à section rectangulaire ont entre eux cette seule différence que l'un a la bouche *étroite* et placée sur le petit côté du rectangle, l'autre la bouche *large* et placée sur le grand côté, celui-ci donnera un son notablement plus aigu que le premier. C'est sans doute pour obtenir un effet analogue que les facteurs d'orgues mettent souvent, aux deux coins de la bouche d'un tuyau de petites lames de plomb qu'ils serrent ou qu'ils écartent pour obtenir l'accord. Ces lames sont les *oreilles*, elles sont là, disent-ils, pour écouter si le tuyau est au ton.

Force du vent. — Dans les longs tuyaux, il faut toujours peu de pression pour obtenir le son fondamental, et des pressions croissantes pour obtenir les harmoniques supérieurs; mais le son fondamental lui-même n'a pas une fixité absolue; quand, avec une bonne embouchure, il se produit dans des limites de pression assez étendues, il change avec le vent, montant ou descendant un peu, suivant que la pression est plus forte ou plus faible. Ce qui arrive ici pour le son fondamental se reproduit, dans une certaines proportions, pour les divers harmoniques.

Embouchure par le centre. — Ces influences de l'embouchure ordinaire se manifestent encore, dans l'embouchure par le centre, c'est-à-dire, dans les tuyaux où le bout qui reçoit le vent est entièrement ouvert, ou fermé par une plaque perpendiculaire à l'axe portant au centre une ouverture ronde, carrée ou rectangulaire, plus ou moins grande. M. Wertheim qui a fait, avec son esprit inventif et sévère, un grand nombre d'expériences sur les vibrations sonores de l'air, a employé cette méthode avec succès. En simplifiant ainsi les effets de l'embouchure, il est parvenu à des lois générales très-curieuses (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXI); mais elles ne peuvent pas se résumer encore assez brièvement, pour qu'il me soit possible de les exposer ici.

48. Vitesse du son dans les fluides élastiques. — Newton avait donné une expression de la vitesse du son dans l'air (voy. les dernières propositions du second livre des *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*). Cette expression conduisait à un résultat trop petit : elle donnait une vitesse qui n'était que les $\frac{5}{6}$ environ de la vitesse donnée par l'expérience. Newton avait lui-même essayé d'expliquer cette différence, mais il était réservé à Laplace d'en trouver la véritable cause. Le mouvement qui constitue le son ne peut pas se propager dans un milieu quelconque sans comprimer les molécules auxquelles il se communique, et comme, en général, toute compression est accompagnée d'un dégagement de chaleur, Laplace suppose que c'est cette chaleur dégagée qui modifie la loi de l'élasticité et qui accélère la propagation du son. Si l'onde condensée produit de la chaleur, l'onde raréfiée produit essentiellement du froid, et l'on pourrait croire que ces deux effets contraires se compensent exactement; ils se compensent en effet pour ce qui regarde la température, car le son qui passe dans l'air n'affecte nullement le thermomètre le plus sensible; mais cette compensation définitive dans la température n'empêche pas qu'il n'y ait successivement, entre deux molécules voisines, dégagement de chaleur et de froid, et n'empêche pas, par conséquent, que la loi de leur élasticité ne s'écarte de la loi de Mariotte.

Après avoir assigné cette cause, Laplace l'a transformée en calcul, et il a été conduit à la formule suivante, pour la vitesse de la propagation du son dans les gaz et les vapeurs :

$$v = \sqrt{\frac{gh}{d} \cdot k}.$$

v, vitesse de propagation en 1″, évaluée en mètres;

g, gravité exprimée en mètres ou $9^{m},8088$;

h, hauteur de la colonne de mercure, évaluée en mètres et réduite à 0°, qui exprime la pression du gaz;

d, densité du gaz, celle du mercure à 0° étant prise pour unité ;

k, rapport des deux chaleurs spécifiques du gaz ou rapport de sa capacité à pression constante à sa capacité à volume constant.

Pour appliquer cette formule à l'air soumis à une pression et

à une température quelconque t, il suffit de remarquer qu'à la température 0 et sous la pression de $0^{m},76$, la densité de l'air par rapport au mercure est $\frac{1}{10466.82}$, et qu'ainsi, à la température t et sous la pression h, on a :

$$d = \frac{h}{0,76 \,.\, 10466,82(1+at)},$$

et par conséquent

$$v = \sqrt{9,8088.0,76.10466,82(1+at).k};$$

et, comme pour l'air $k = 1,421$, il en résulte

$$v = 331,45\sqrt{1+at}$$

pour la vitesse du son dans l'air à la température t.

a est le coefficient de la dilatation des gaz ou 0,00367.

On voit que cette vitesse est tout à fait indépendante de la pression, et dépendante seulement de la température.

La formule précédente donnera sans doute avec la même exactitude la vitesse du son dans tous les fluides élastiques, lorsqu'on connaîtra pour chacun d'eux le rapport k des deux chaleurs spécifiques; ou réciproquement, la vitesse de la propagation du son dans un gaz quelconque étant déterminée, on en pourra déduire la valeur de k; et il se présente un procédé qui paraît simple pour chercher la vitesse du son dans un gaz : il consiste à faire vibrer un tuyau de longueur connue, rempli de ce gaz, et à noter le son résultant. Ces expériences n'ont pas moins d'intérêt pour la théorie de la chaleur que pour celle de l'acoustique; et l'on voit à quel degré de perfection ces théories ont été portées par Laplace, puisqu'il suffit qu'un expérimentateur écoute le son produit par un tuyau vibrant de grandeur connue, pour en pouvoir déduire la vitesse de propagation du son dans le gaz qui remplit le tuyau, et même le rapport de deux chaleurs spécifiques de ce gaz (Dulong, *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XLI, p. 113, 2e série).

49. Vitesse du son dans l'air déterminée par la vibration des tuyaux. — Cette détermination serait facile si les lois de vibration des tuyaux pouvaient devenir mathématiquement exactes, et si la longueur de l'onde était, en toute rigueur, égale à la longueur du tuyau ouvert qui rend le son fondamental, ou au double de la longueur du tuyau fermé. Mais, comme nous l'avons dit tout à l'heure (**47**), ces lois simples ne se réalisent

Digitized by Google

jamais; le son éprouve des variations accidentelles, et, n'en éprouvât-il pas, la longueur n'est pas égale à celle du tuyau à cause des perturbations, jusqu'à présent inévitables, qui se produisent près de l'embouchure et près de l'autre bout des tuyaux ouverts. C'est là que se trouve l'écueil; cependant M. Wertheim est parvenu à l'éviter par un détour ingénieux qui semble au moins approcher du but. Essayons de donner en peu de mots une idée de sa méthode.

n étant le nombre de vibrations simples exécutées en 1" par une corde, une lame, un tuyau, un instrument quelconque; l la longueur de l'onde sonore correspondante; v la vitesse du son dans l'air; on a la relation

$$v = nl.$$

Nous avons vu (37) comment se détermine le nombre n des vibrations appartenant à un son donné; il suffit donc de prendre l'unisson d'un tuyau avec la sirène ou avec la corde d'un sonomètre bien réglé, pour en déduire la valeur de n qui lui convient; et, si la longueur l de l'onde était égale à celle du tuyau, il suffirait de mesurer celui-ci avec exactitude, pour avoir la valeur de v. Mais l'expérience démontre que la longueur de l'onde est *plus grande* que celle du tuyau, et que cet excès variable ne semble soumis à aucune loi; il est présumable cependant qu'il est d'autant plus petit que le tuyau a plus de longueur, le diamètre restant le même.

D'après cela, M. Wertheim a eu l'idée d'adapter successivement à la même embouchure des tuyaux parfaitement identiques, mais de longueur différente, et de chercher pour ce cas particulier, une formule empirique qui pût donner la valeur des corrections.

l, l', représentant deux longueurs différentes du même tuyau adaptées successivement à la même embouchure;

n, n', les nombres de vibrations simples correspondant au son fondamental de l et de l';

v, v', les vitesses inexactes et trop petites qui s'en déduiraient en prenant la longueur du tuyau pour la longueur de l'onde;

z, la correction, c'est-à-dire, ce qu'il faut ajouter à la longueur du tuyau pour avoir la longueur de l'onde;

On aurait, d'une part,

$$v = nl; \quad v' = n'l',$$

Digitized by Google

et M. Wertheim pose

$$z = \frac{v' - v}{n - n'},$$

en prenant $l < l'$, ce qui entraîne $n' < n$; alors la valeur de z sera positive, si la valeur de v' est plus grande que celle de v, ou si en effet l'excès de la longueur de l'onde sur celle du tuyau est moindre pour le tuyau le plus long l'.

En opérant de la sorte avec toutes les précautions qu'exigent des expériences aussi délicates, M. Wertheim est parvenu à déterminer la vitesse du son dans l'air avec une précision remarquable : ses expériences, faites à dessein dans des conditions atmosphériques très-diverses, à des températures variables de 0 à 27°, lui donnent en définitive des vitesses qui, réduites à 0°, se trouvent comprises entre 325 et 355 mètres, et le plus grand nombre de ses déterminations se rapproche beaucoup de 331^{m},45, qui est le nombre adopté maintenant.

Ces résultats ont été obtenus avec quatre systèmes de tubes cylindriques ayant les dimensions suivantes :

			Diamètres. mm	Longueur l mm	Longueur l'. mm
1er	système.	Laiton............	40	332,5	1000,5
2^{e}	*id.*	*id.*.............	20	97,5	373,0
3^{e}	*id.*	*id.*.............	10	88,0	288,0
4^{e}	*id.*	Verre............	20	100,0	1231,0

La correction z, variable suivant les circonstances, est restée cependant comprise entre des limites assez étroites, d'environ 60 à 65 millimètres pour le premier système, de 30 à 35 pour le deuxième, de 17 à 18 pour le troisième, de 40 à 45 pour le quatrième, M. Wertheim remarque que la correction change avec la matière du tuyau, et que pour la même matière elle est à peu près proportionnelle au diamètre.

50. De la réflexion du son et des échos. — Lorsque les ondes sonores passent d'un milieu dans un autre, elles éprouvent toujours une réflexion partielle, et lorsqu'elles rencontrent un obstacle fixe, elles éprouvent alors une réflexion presque totale.

Que la réflexion soit partielle ou totale, elle s'accomplit toujours dans une direction telle que l'angle de réflexion soit égal à l'angle d'incidence. Ces lois générales ne peuvent être démon-

Digitized by Google

trées que par les principes de la mécanique, et nous devons seulement essayer ici de les faire comprendre. Si *ss'* (Pl. 29, Fig. 37) représente la surface de séparation de deux milieux comme l'air et l'eau, et qu'une ondulation sonore vienne, par exemple, tomber sur l'eau dans la direction *di*, en faisant avec la perpendiculaire *ip* un angle *dip*, une partie du mouvement qui la constitue se communiquera à la masse d'eau, et l'autre partie se communiquera à l'air dans la direction *ir*, de manière que l'angle d'incidence *dip* soit égal à l'angle de réflexion *pir*. Ce phénomène se produirait encore suivant la même loi, si la surface *ss'* était la surface de jonction de deux gaz différents, ou deux portions d'un même gaz ayant des densités différentes, ou si elle était un plan solide de bois, de pierre ou de métal; seulement, dans ce dernier cas, le son réfléchi suivant *rid*, aurait beaucoup plus d'intensité. Ainsi, un observateur qui serait placé quelque part sur cette ligne *ri*, entendrait le son comme s'il était produit en *i*, ou sur le prolongement de *ri*.

C'est sur ce principe général que repose l'*explication des échos*.

Quand un *écho* renvoie le son au point de départ, il est évident que les ondes sonores vont tomber perpendiculairement sur la surface réfléchissante, qui doit être en conséquence un plan ou une surface sphérique dont le centre est le point de départ lui-même. Dans ces circonstances, un écho peut répéter un nombre de syllabes plus ou moins grand suivant des conditions faciles à déterminer. On sait, par exemple, qu'en articulant très-vite on peut prononcer assez nettement 8 syllabes en 2″; or, en 2″ le son parcourt deux fois 340 mètres; par conséquent, si un écho se trouve à 340 mètres seulement, il renverra successivement dans leur ordre toutes les syllabes, et la première reviendra à l'observateur après 2″, c'est-à-dire à l'instant où la dernière sera prononcée. A cette distance, un écho pourra donc répéter 7 ou 8 syllabes; on en cite qui répètent jusqu'à 14 ou 15 syllabes.

Il n'est nullement nécessaire que la surface réfléchissante soit dure et polie; car on observe souvent à la mer que les nuages forment écho, et l'on observe surtout que les voiles d'un bâtiment éloigné, lorsqu'elles sont bien tendues, forment des échos assez parfaits.

Les ondes sonores doivent aussi être réfléchies dans une at-

Digitized by Google

mosphère sans nuages, quand le soleil dans toute sa force répand une vive chaleur à la surface de la terre, car les divers points d'une plaine ou d'une colline ne peuvent être également échauffés; l'évaporation, les ombres et d'autres causes encore s'y opposent. Cette inégalité de température détermine une foule de courants chauds ascendants et de courants froids descendants dont la densité n'est pas la même. Ainsi l'onde sonore se réfléchit en partie à chaque passage d'un courant dans l'autre, et, si le son réfléchi n'est pas assez fort pour former écho, il atténue cependant le son direct d'une manière très-sensible. C'est sans doute pour cette raison, comme l'a fait remarquer M. de Humboldt, que le son se propage toujours à de plus grandes distances la nuit que le jour, même au milieu des forêts de l'Amérique, où les animaux, silencieux pendant le jour, troublent et agitent l'atmosphère de mille bruits confus pendant la nuit.

L'explication des *échos multiples*, c'est-à-dire qui répètent plusieurs fois la même syllabe, repose encore sur les mêmes principes. Car un son réfléchi ayant la propriété de se réfléchir de nouveau, il est évident que deux surfaces réfléchissantes pourront se renvoyer le son comme deux miroirs opposés se renvoient la lumière. Aussi c'est entre des tours, ou entre des murs parallèles et éloignés, que les échos multiples se font entendre. On citait autrefois un écho situé près de Verdun, qui répétait 12 ou 13 fois le même mot; il était formé par deux tours voisines.

Enfin, il y a des *échos* qui font à peu près l'office de *porte-voix*. On les observe sous des voûtes plus ou moins hautes. Supposons que la section d'une voûte par un certain plan donne une ellipse aba' (Pl. 29, Fig. 38), dont les foyers soient en f et f'; un son formé en f ira par sa réflexion sur toute la courbe aba' se concentrer en f', car on sait que dans l'ellipse tous les rayons menés des points f et f' au même point de la courbe font des angles égaux avec cette courbe ou avec la tangente en ce point ou avec la normale. Ainsi, les ondes sonores qui vont suivant fi, fi', etc., se réfléchissent suivant if', $i'f'$, etc. Par conséquent, deux personnes qui seraient placées l'une en f et l'autre en f' pourraient s'entendre à la distance de 20 ou même de 30 mètres en parlant à voix très-basse, sans qu'aucun mot pût être saisi par des auditeurs intermédiaires. Il y a au Conserva-

Digitized by Google

toire des Arts et Métiers une grande salle carrée qui présente ce phénomène.

La figure 30 (Pl. 30) représente un appareil de M. Weber qui est bien propre à montrer l'effet de la réflexion des ondes : c'est un vase elliptique contenant du mercure ; les ondes produites par un filet de mercure qui tombe à l'un des foyers, se propagent et se réfléchissent vers l'autre foyer.

51. Des surfaces nodales que l'on observe dans les grandes masses d'air qui sont en vibration. — Lorsqu'on produit un son très-intense et soutenu dans une galerie ou seulement dans une chambre ordinaire, on observe que le même son n'a pas la même intensité dans toute l'étendue de l'enceinte : dans certains points il est fort et assourdissant, dans d'autres il est très-faible; ces derniers points sont comme des nœuds de vibration où l'air n'éprouve que de très-petits déplacements. Savart a essayé de suivre la trace de ces lignes ou surfaces nodales, et nous indiquerons seulement le procédé dont il s'est servi, car il n'y a sur ce sujet aucun résultat simple et général. Le son est produit avec un timbre et un tuyau renforçant, et on l'écoute aux différents points de l'enceinte avec une espèce d'oreille artificielle, qui se compose d'un cône évasé, d'un tube conique et d'une membrane. *cc'* (Pl. 29, Fig. 33) représente le cône, *tt'* le tuyau, et *mm'* la membrane; celle-ci doit être posée sur les bords du tube recourbé, et ajustée pour recevoir divers degrés de tension. On place l'axe du cône dans la direction suivant laquelle on veut écouter, et l'on juge de l'intensité du son par les vibrations de la membrane, c'est-à-dire par les mouvements du sable dont on la recouvre à l'instant de l'expérience.

La grandeur de l'enceinte, sa forme et tous les accidents que présentent ses parois, sont autant de causes qui font varier les formes et les positions des surfaces nodales pour une même position du timbre. Quant à la cause elle-même qui détermine la formation des nœuds, c'est, sans aucun doute, la rencontre des ondes directes et des ondes réfléchies.

52. Divers moyens de faire vibrer les liquides. — Quand deux corps solides choqués sous l'eau excitent un bruit qui retentit au loin, le liquide est ébranlé *directement* dans tous les points où il touche les surfaces des corps solides vibrants, et il est alors ébranlé comme le sont les gaz par les frémissements d'une cloche. C'est encore par un choc direct que les vibrations

normales des disques et les vibrations longitudinales des verges dont nous avons parlé précédemment, peuvent ébranler l'eau, le mercure ou les autres liquides. Ainsi l'on pourrait penser que le choc des solides est indispensable pour faire vibrer les liquides : mais le jeu de la sirène peut exciter dans l'eau, et sans doute aussi dans tous les liquides, des vibrations sonores qui ont une autre origine. On en fait l'expérience de la manière suivante : *v* est un vase large et profond (Pl. 29, Fig. 39), dans lequel on ajuste solidement une sirène en *s* : le tuyau porte-vent *t* est fermé par un robinet *r* et devient ici un tuyau porte-liquide, car il communique à un tube de plomb *p* rempli d'eau, qui descend d'un réservoir élevé de 4 ou 5 mètres. L'appareil étant ajusté, on met de l'eau dans le vase *v* jusqu'au-dessus du plateau mobile de la sirène, on ouvre le robinet *r*, et à l'instant l'eau jaillit, le plateau tourne et l'on entend un son très-distinct. On pourrait penser que le son se communique par les montants de l'instrument qui s'élèvent encore au-dessus du niveau : mais ces montants sont bientôt cachés eux-mêmes par l'eau qui arrive, et, quand tout l'appareil est enfoncé sous l'eau de plusieurs décimètres, le son se fait encore entendre, et il paraît même plus pur et mieux soutenu.

Le liquide poussé d'abord dans les ouvertures de la table et du plateau, puis arrêté, puis poussé et arrêté de nouveau, et ainsi de suite par de rapides alternatives, éprouve précisément ce que les gaz éprouvent dans les mêmes circonstances.

Il y a sans doute encore d'autres moyens d'exciter dans les liquides des vibrations sonores sans la percussion des solides : on sait, par exemple, qu'un courant d'étincelles électriques produit un bruit net et soutenu, au milieu d'une masse liquide; et probablement, si l'on ajustait un appareil pour enflammer au milieu de l'eau, par l'électricité, de petites bulles du mélange détonant d'hydrogène et d'oxygène, qui se succéderaient rapidement, l'on produirait ainsi des bruits très-intenses, sans employer d'autres solides que les bouts de fil mince qui apporteraient le fluide électrique; encore pourrait-on les remplacer par de petites colonnes de mercure contenues dans des tubes de matière très-peu élastique.

On avait fait d'inutiles efforts, pour faire vibrer les liquides, à la manière des gaz, dans des tuyaux ouverts ou fermés. M. Wertheim a très-habilement surmonté les difficultés nom-

breuses qui se présentent dans ces sortes de recherches; non-seulement il est parvenu à produire des sons, avec des tuyaux, au sein des masses liquides, mais il est parvenu à les rendre réguliers, durables, et assez bien caractérisés pour qu'il soit facile d'en prendre l'unisson et d'avoir ainsi le nombre des vibrations correspondantes. Les tuyaux dont il a fait usage diffèrent peu des tuyaux à air; cependant l'embouchure doit être disposée avec des soins particuliers; en général la bouche doit être moins large, moins ouverte, et la lumière un peu plus grande, dirigeant la lame liquide qui s'en échappe plus obliquement vers l'intérieur du tuyau. M. Wertheim a constaté que la masse liquide qui enveloppe la colonne vibrante n'ayant pas d'influence sur le son, il est possible d'opérer avec d'assez petits volumes; c'est ainsi qu'il a pu réduite les dimensions de son grand appareil, pour soumettre à l'expérience des liquides plus variés.

53. **Vitesse du son dans les liquides.** — M. Wertheim avait été conduit par des recherches antérieures (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXIII, p. 52) à cette proposition remarquable : que dans les solides et probablement dans les liquides, le son qui se propage librement dans une masse indéfinie a une vitesse plus grande que celui qui se propage dans un espace limité, comme un filet cylindrique, une barre ou une colonne; que v représentant la première vitesse, v' la seconde, on doit avoir

$$v = v'\sqrt{\frac{3}{2}}.$$

L'eau semble être le seul corps sur lequel il soit possible de vérifier cette déduction théorique. M. Colladon a déterminé la vitesse du son dans la masse indéfinie du lac de Genève; d'après ses expériences, très-habilement dirigées, cette vitesse, pour la température de 9°, est de

1435 mètres.

Il y avait donc une grande importance à faire vibrer l'eau dans les tuyaux, pour savoir si elle y prendrait la *vitesse libre* ou la *vitesse de filet*. C'est cette question fondamentale, pour la théorie des actions moléculaires qui a conduit M. Wertheim à entreprendre la série des recherches difficiles dont nous venons de parler. Au moyen de la méthode qu'il avait appliquée à l'air, et que nous avons indiquée plus haut (**49**), il a reconnu d'abord

que, dans les liquides, la longueur de l'onde sonore dans la colonne vibrante se trouve aussi plus grande que la longueur du tuyau; il a démontré ensuite que la valeur de la correction peut se déterminer par la même formule et par un système d'expérience analogue, bien que sa grandeur soit en général un peu moindre dans l'eau que dans l'air.

C'est ainsi que la vitesse du son dans l'eau, entre 10° et 20°, a été trouvée de

1173 mètres,

valeur moyenne d'un grand nombre d'expériences dont les plus discordantes donnaient 1130 mètres pour minimum et 1208 pour maximum.

Il y a donc une différence considérable entre cette vitesse et celle qui résulte de l'expérience directe du lac de Genève; mais si, conformément à la proposition de M. Wertheim, on multiplie par $\sqrt{\frac{3}{2}}$ la vitesse 1173 de la colonne vibrante, on trouve 1437, nombre qui coïncide alors d'une manière surprenante avec celui de M. Colladon. M. Wertheim porte dans ses expériences une habileté et une rigueur trop bien connues pour que ce résultat ne doive pas être regardé comme une preuve décisive de la vérité de sa proposition.

Les autres liquides sur lesquels il a opéré en donnent encore une autre confirmation, moins directe, il est vrai, mais non moins plausible. En effet, dès le commencement de ce siècle, Laplace, dans sa *Théorie des actions moléculaires*, est parvenu à exprimer la vitesse libre du son dans les liquides par la formule

$$v=\sqrt{\frac{g}{\lambda}}.$$

v, vitesse du son exprimée en mètres;

g, gravité exprimée en mètres ou $9^m,8088$;

λ, raccourcissement qu'éprouve une colonne horizontale du liquide, de 1 mètre de longueur, lorsqu'elle est comprimée dans un tube sans élasticité par un poids égal au sien.

D'après cela λ dépend de la compressibilité du liquide, et peut être exprimé, soit au moyen de la compressibilité, prise en général, soit au moyen de la compressibilité évaluée en millioniémes du volume primitif, comme nous l'avons fait dans nos tableaux précédents (19). En effet, représentons par c la com-

pressibilité d'un liquide telle qu'elle est inscrite dans ces tableaux, c sera le nombre de millionièmes dont le volume diminue sous une pression de 1 atmosphère; soit d la densité de ce liquide et h la hauteur en mètres de la colonne équivalente à 1 atmosphère, on aura, par comparaison avec le mercure,

$$h = \frac{0,76 \times 13,598}{d}$$

ainsi, une colonne horizontale du même liquide, de 1 mètre de longueur et d'une section quelconque s, pressée par une colonne verticale de h mètres de hauteur, éprouverait une diminution de volume de c millionièmes, et, si elle était pressée seulement par une colonne de 1 mètre de hauteur sa diminution de volume serait $\frac{c}{h}$ millionièmes, ou

$$\frac{c.s.1}{1000000.h}.$$

Or, λ étant le raccourcissement que la même colonne éprouve dans les mêmes circonstances, lorsqu'elle est contenue dans un tube sans élasticité, sa diminution de volume est $\lambda.s$; on a donc

$$\lambda = \frac{c}{1000000.h} = \frac{cd}{1000000 \times 0^{m},76 \times 13,598},$$

en substituant cette valeur de λ dans la formule générale, la vitesse v devient

$$v = 10068,21 \sqrt{\frac{1}{cd}},$$

sur quoi il faut remarquer : 1°, que c est ici exprimé en millionièmes comme dans nos tableaux de compressibilité (**19**); 2° que d est la densité du liquide pour la température de l'expérience, mais toujours rapportée à celle de l'eau prise à 4°,1.

Cette vitesse est la vitesse libre, celle qu'on observerait dans une masse illimitée, il n'y a donc véritablement que l'eau des lacs et l'eau de la mer sur lesquelles une vérification expérimentale et directe soit possible. Or, M. Wertheim ayant par sa méthode déterminé les vitesses de filet pour douze liquides différents, a multiplié ces vitesses par $\sqrt{\frac{3}{2}}$ pour en déduire les vitesses libres, et au moyen de celle-ci, et de la formule précédente, il a pu en déduire les compressibilités c pour les comparer à celles de l'expérience. Le tableau suivant contient le résultat de cette comparaison.

Digitized by Google

NOM du LIQUIDE.	TEMPÉRATURE.	DENSITÉ.	VITESSE DU SON.		COMPRESSIBILITÉ	
			Vitesse de filet observée	Vitesse libre calculée.	déduite par le calcul.	donnée par l'expérience.
Eau de Seine	15,0	0,9996	1173,4	1437,1	49,1	47,7
Id.	30,0	0,9963	1250,9	1528,5	43,3	45,3
Id.	40,0	0,9931	1324,8	1622,5	38,8	44,2
Id.	50,0	0,9893	1349,0	1652,2	37,5	44,1
Id.	60,0	0,9841	1408,2	1724,7	34,6	»
Eau de mer (artificielle)	20,0	1,0264	1187,0	1453,8	46,7	43,6
Chlorure de sodium	18,0	1,1920	1275,0	1561,6	34,9	25,7
Sulfate de soude	20,0	1,1089	1245,2	1525,1	39,3	»
Id.	18,8	1,1602	1292,9	1583,5	34,8	»
Carbonate de soude	22,2	1,1828	1301,8	1594,4	33,7	29,7
Azotate de soude	20,9	1,2066	1363,5	1669,9	30,1	29,5
Chlorure de calcium	22,5	1,4332	1616,3	1979,6	18,1	20,6
Alcool ordinaire à 36°	20,0	0,8362	1049,9	1285,9	73,3	»
Alcool absolu	23,0	0,7960	947,0	1159,8	94,7	90,4
Essence de térébenthine	24,0	0,8622	989,8	1212,3	80,0	71,4
Éther sulfurique	0,0	0,7429	946,3	1159,0	100,2	111,0

Les compressibilités inscrites dans la dernière colonne sont tirées des tableaux que nous avons donnés (**19**), elles se rapportent, en général, soit à des températures, soit à des densités qui diffèrent de celles des liquides vibrants de M. Wertheim. Malgré cela, la seule discordance un peu frappante est celle qui se trouve dans la dissolution de chlorure de sodium; elle doit être signalée comme exceptionnelle, pour faire mieux ressortir tout le mérite de ces difficiles et si importantes recherches de M. Wertheim.

54. Vitesse du son dans les solides. — On doit à Chladni une méthode expérimentale très-simple pour déterminer la vitesse du son dans les corps solides; elle est fondée sur l'analogie qui existe entre les vibrations d'un tuyau ouvert qui rend le son fondamental et les vibrations longitudinales d'un prisme solide.

Soit v' la vitesse du son dans une substance solide quelconque, l la longueur d'une verge cylindrique ou prismatique de cette substance, et n' le nombre des vibrations qu'elle fait en 1", lorsqu'elle donne le son fondamental, c'est-à-dire lorsqu'elle vibre longitudinalement, ayant ses extrémités libres et un nœud au milieu : la longueur des ondes qu'elle excite alors dans sa propre substance est égale à l; ainsi les n' ondulations qu'elle excite en 1" forment une longueur $n'l$ qui est précisé-

Digitized by Google

ment égale à la vitesse v' du son, c'est-à-dire, à l'espace que le son parcourt en 1″. On a donc :

$$v' = n'l.$$

Pour un tuyau de même longueur l on a aussi approximativement :

$$v = nl; \quad \text{par conséquent} \quad v' = v . \frac{n'}{n}.$$

D'où il suit que pour avoir une valeur approchée de la vitesse v' du son dans une substance solide quelconque, il suffit d'écouter le son fondamental que produit une verge de cette substance vibrant longitudinalement, et de le comparer au son fondamental que donne un tuyau ouvert de même longueur. Le rapport de ces sons, multiplié par la vitesse du son dans l'air, donne pour produit la vitesse cherchée.

Supposons, par exemple, que l'on fasse vibrer longitudinalement une verge ou une lame de bois de pin de 8 pieds de longueur, en la soutenant au milieu et en la frottant vers un de ses bouts avec un morceau de drap enduit de colophane : le son qu'elle produit se trouve à l'unisson sur le clavier avec ut_5. Or, on sait qu'un tuyau ouvert de 8 pieds produirait ut_1 ; ainsi, $\frac{n'}{n} = \frac{ut_5}{ut_1} = \frac{2^5}{2} = 16$. D'où il suit que dans le bois de pin, la vitesse est 16 fois plus grande que dans l'air, ou

$$v' = 340.16 = 5440.$$

C'est d'après une série d'expériences analogues que Chladni a dressé le tableau suivant :

TABLEAU DES VITESSES DU SON DANS PLUSIEURS SUBSTANCES SOLIDES.

Noms des substances.	Vitesses comparées à celle du son dans l'air.
Fanon de baleine.	6 2/3
Étain.	7 1/2
Argent.	9
Bois de noyer.	10 2/3
» d'if.	
Laiton.	
Bois de chêne.	10 2/3
» de prunier.	

Noms des substances.	Vitesses comparées à celle du son dans l'air.
Tubes de pipes de tabac	10 / 12
Cuivre rouge	12
Bois de poirier	12 1/2
» de hêtre rouge	12 1/2
» d'érable	13 1/2
» d'acajou	14 2/5
» d'ébène	14 2/5
» de charme	14 2/5
» d'orme	14 2/5
» d'aune	14 2/5
» de bouleau	14 2/5
» de tilleul	15
» de cerisier	15
» de saule	16
» de pin	16
Verre	16 2/3
Fer ou acier	16 2/3
Bois de sapin	18

Savart a obtenu par cette méthode des résultats qui confirment ceux de Chladni ; cependant il a pu constater quelques différences dépendant de l'état moléculaire des échantillons. Ainsi le cuivre rouge varie de 11,13 à 12,21, le laiton de 10,40 à 10,70 ; le fer et les aciers différents donnent 15 ; le verre de glace 16, le verre des tubes 11,86 ; le sapin du nord 16,39, le sapin des Vosges 16,54.

Ces résultats ont été calculés en prenant, pour les vibrations de l'air, la longueur de l'onde égale à celle du tuyau ; il faudrait donc y introduire la correction que pourrait donner la méthode de M. Wertheim. La vitesse du son dans les corps solides se déduit aussi de la théorie mathématique des actions moléculaires, elle est exprimée par la même formule

$$v=\sqrt{\frac{g}{\lambda}},$$

qui appartient aux liquides ; alors pour en faire l'application il faut déterminer λ par la liaison, incertaine à quelques égards, qu'il doit avoir avec le coefficient d'élasticité.

CHAPITRE V.

Des Vibrations de quelques Instruments de musique.

55. **Communication des vibrations sonores entre les solides et les fluides.** — Les liquides et les gaz ne reçoivent, en général, leur mouvement de vibration que par le choc direct des corps solides, ou au moins par l'intermédiaire de ces corps, comme dans la sirène et les tuyaux; mais dès qu'ils ont reçu ce mouvement, ils peuvent à leur tour le transmettre à tous les corps solides qu'ils rencontrent. C'est ainsi, par exemple, que l'on voit une corde d'instrument se mettre en vibration dès qu'elle *entend* le son qu'elle peut rendre ou l'un de ses harmoniques, et que des carreaux de vitres s'ébranlent et vibrent fortement sous l'influence de certains sons de la voix, comme sous l'influence du bruit du canon. Ce phénomène, qui se présente d'une manière frappante sur tous les corps solides très-mobiles, se produit pareillement dans les corps plus inertes et moins élastiques, et il n'y a peut-être pas une cathédrale dont la grosse cloche ne fasse vibrer d'une manière sensible certains piliers ou certains massifs considérables. Il est permis de conclure ici de ce que l'on observe à ce que l'on n'observe pas, et puisqu'une masse solide quelconque peut entrer en vibration sous le choc du marteau et produire un son déterminé, on peut conclure qu'elle entrera en vibration plus ou moins marquée lorsque ce son, en traversant l'eau ou l'air, viendra la frapper. On peut conclure qu'en général elle entrera en vibration pour tous les sons possibles, car en général il n'y a pas de son qu'elle ne puisse rendre, soit comme son fondamental, soit comme harmonique, si elle était convenablement ébranlée; et par conséquent il n'y a pas de son qui, en la frappant, ne détermine en elle un certain mode de vibration. Si l'on conservait quelque doute sur cette conclusion générale, il suffirait de remarquer que le son produit dans un fluide est transmis avec plus ou moins de facilité par une masse solide quelconque, et que certainement il ne peut être transmis par elle sans l'avoir forcée à

vibrer à l'unisson avec lui. Mais il serait curieux de savoir comment le mouvement se détermine suivant les diverses obliquités des surfaces par rapport à la direction de l'onde. Il n'y a sur ce sujet qu'un très-petit nombre d'expériences : Savart a constaté, par exemple, qu'une membrane tendue sur un cadre ne vibre pas de la même manière quand on lui présente une plaque sonore, perpendiculairement ou parallèlement. Dans le premier cas, ses vibrations sont tangentielles, et dans le second elles sont normales comme celles de la plaque.

Il est probable que les liquides sont plus efficaces que les gaz pour déterminer ainsi des vibrations dans les solides, et sans doute, en disposant sous l'eau des corps de différentes formes, l'on pourrait, avec le sable, reconnaître des vibrations que le même moyen ne rendrait pas sensibles dans l'air.

56. Communication des vibrations dans les corps solides contigus. — Puisque les vibrations se transmettent des fluides aux solides, elles doivent à plus forte raison se transmettre dans toute l'étendue d'un système solide dont les diverses parties sont juxtaposées et tellement contiguës qu'elles ne laissent entre elles aucune solution de continuité. Un pareil système ne forme plus qu'un tout, qui, dès qu'un point est ébranlé, se partage comme un seul corps, en parties vibrantes séparées par des lignes nodales; chacune des pièces perd en quelque sorte son individualité; sa liaison avec les pièces voisines l'empêche de vibrer comme elle ferait si elle était seule; à peu près comme une portion de plaque prend des modes de vibrations différents, si elle est détachée et ébranlée à part ou si elle reste unie à la plaque entière.

Savart a fait un grand nombre d'expériences sur ce sujet; il a varié les appareils de mille manières pour montrer le fait général de la communication du mouvement dans toutes les parties d'un système composé de lames, de plaques, de cloches, de cordes, etc. Parmi les résultats que nous pourrions puiser dans son mémoire sur ce sujet (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXV), nous choisirons de préférence l'exemple suivant, qui a l'avantage de montrer l'influence de la direction du mouvement sur la formation des lignes nodales. Une lame de bois *a* (Pl. 30, Fig. 17) est fixée par une de ses extrémités et tirée à l'autre extrémité par une corde *b* qui se tend plus ou moins au moyen de la clef *c*; lorsque la corde est ébranlée avec l'archet, elle rend un

son facile à apprécier, et aussitôt la lame *a* entre aussi en vibration. Pour le même son, les lignes nodales qu'elle présente sur ses faces supérieures et inférieures sont dépendantes de l'obliquité de l'archet ou du plan dans lequel vibre la lame, comme on le voit par les figures 18, 19, 20 et 21, où *a* est la section de la lame, *h* la direction de l'archet, et *s* et *s'* les lignes nodales correspondantes à cette direction, sur les faces supérieures et inférieures de la lame. Ainsi, non-seulement les vibrations se communiquent, mais le sens dans lequel elles s'exécutent dépend du sens dans lequel est tirée la première molécule qui reçoit l'action de la corde.

L'appareil de la figure 16 est destiné à montrer aussi des communications de mouvement et les vibrations longitudinales que la corde *c* reçoit de la petite tige *t*, que l'on ébranle avec un archet.

57. **Des instruments à anches.** — Une anche est, en général, une lame vibrante, mise en mouvement par un courant d'air. Supposons, par exemple, que dans une plaque de zinc ou de cuivre *p* (Pl. 29, Fig. 29), de 2 ou 3 millimètres d'épaisseur, on fasse une ouverture rectangulaire *abcd*, longue de 3 centimètres et large de 7 ou 8 millimètres seulement, et que l'on soude, près de l'un de ses petits côtés, une lame de cuivre *l*, très-mince et très-élastique, qui puisse vibrer dans cette ouverture en rasant les bords *ab*, *bc* et *cd*. On aura ainsi la plus simple des anches, et pour la mettre en mouvement il suffira d'appuyer la plaque *p* longitudinalement contre les lèvres, et de souffler en dirigeant le vent vers l'extrémité libre de la lame *l*. L'air la met en vibration, et l'ouverture *abcd* étant ainsi alternativement ouverte et fermée, l'air passe et s'arrête par intermittences; de là des ondulations sonores dont la longueur dépend du nombre des vibrations que la lame vibrante peut exécuter à raison de ses dimensions et de son élasticité. Le son est le même que si la lame vibrait par écartement mécanique, mais il est plus intense. En disposant sur la même plaque plusieurs lames qui donnent les sons de la gamme, on peut faire un instrument propre à jouer des airs.

L'anche dont on se sert dans les jeux d'orgues repose sur le même principe, mais elle est autrement ajustée. On y distingue deux tuyaux mis bout à bout, *t* et *t'* (Pl. 29, Fig. 27), un bouchon *b* qui les sépare, et l'anche *a*, proprement dite, qui traverse

ce bouchon. L'anche elle-même est représentée en détail dans la figure 28 ; elle se compose de trois pièces essentielles, la *rigole r*, la *languette l* et la *rasette z*.

La rigole est un tube de métal prismatique, fermé au bout inférieur, ouvert au bout supérieur, et percé latéralement d'une fenêtre qui établit la communication entre les deux tuyaux de part et d'autre du bouchon.

La languette est la lame vibrante; dans sa position naturelle elle ferme la fenêtre ou à peu près, c'est-à-dire qu'elle en rase les parois par ses trois bords libres pendant qu'elle accomplit ses battements; son quatrième bord est solidement fixé sur la paroi du tube.

La rasette est un fil de métal très-ferme, recourbé à sa partie inférieure par laquelle il appuie fortement sur toute la largeur de la languette, comme on le voit dans la figure 25. Elle glisse à frottement dans le bouchon; elle sert à changer la longueur vibrante de la languette, car, au-dessus de la rasette, rien ne peut vibrer.

Le vent du soufflet entre par le pied du tuyau *t*, presse la languette pour s'ouvrir un passage, traverse la rigole et sort par le tuyau *t'*. La languette ainsi écartée pour un instant est bientôt rappelée par son élasticité, et accomplit sous ces deux forces contraires des vibrations qui se répètent aussi longtemps que dure le courant d'air. La figure 27 représente un tuyau à anche qui est vitré vis-à-vis la languette pour que l'on puisse en observer le jeu. Le nombre des vibrations dépend surtout des dimensions de la languette et de sa rigidité ; il est en général peu différent de ce qu'il serait si cette lame vibrait à vide par un écartement mécanique. Mais l'ajustement des tuyaux donne au son un timbre et une intensité remarquables ; ces deux qualités sont ici très-intimement liées : cependant l'intensité dépend surtout de la vitesse du courant, et le timbre de la forme des tuyaux. L'on conçoit en effet qu'un courant plus rapide détermine dans la languette des oscillations dont l'amplitude est plus grande, leur durée restant la même ; ainsi, l'intensité du son croît avec la vitesse du courant, à moins que cette vitesse ne soit assez grande pour fléchir la languette et y déterminer un nœud de vibration. L'on conçoit ensuite que la languette, les tuyaux et les masses d'air qu'ils contiennent, forment un système vibrant dont toutes les parties donnent au son un timbre

particulier. Une condition fondamentale pour que l'anche *parle bien* et rende un son plein et agréable, c'est que les masses d'air des tuyaux soient telles par leur forme et leur étendue, qu'elles se mettent facilement à l'unisson avec la languette; mais cette condition peut être remplie pour chacun d'eux d'une infinité de manières, et l'on a fait de nombreux essais pour produire par ce moyen des sons articulés imitant la voix humaine : on a donné au tuyau inférieur des formes anguleuses, rentrantes, ou diversement contournées; on a fait le tuyau supérieur conique, évasé, renflé en son milieu; on y a tendu des membranes, et disposé des feuilles ou des lames diverses; il n'y a pas une de ces modifications qui ne donne au son un timbre particulier, et l'on peut ajouter que plusieurs combinaisons de cette sorte, imaginées par M. Grénié, n'ont pas été sans succès pour faire sortir des tuyaux d'anches certains sons plus ou moins analogues au son des voyelles articulées par la voix humaine.

Dans les jeux d'orgues, il y a des anches d'une autre sorte qui sont appelées *anches battantes* ou *anches canardes*, à cause du timbre particulier de leurs sons; elles diffèrent des précédentes en ce que la languette vient par ses bords battre sur les bords de la rigole (Pl. 29, Fig. 24, 25 et 26).

Les embouchures de basson, de hautbois et de clarinette, ne sont autre chose que des anches diversement ajustées : dans ces instruments, c'est la pression des lèvres qui tient lieu de rasette.

58. Des instruments à cordes. — Tous les instruments à cordes ont une caisse sonore, et tout le monde sait que la qualité du son dépend de la construction de la caisse. La corde, la caisse et l'air qu'elle contient, forment encore un système vibrant dont chaque partie imprime au son un timbre particulier. C'est la corde qui donne le ton, c'est-à-dire que, dans le reste de l'instrument, toutes les pièces doivent se mettre à l'unisson avec elle, et pour cela se partager convenablement par des lignes nodales.

Il est clair, en effet, que la liaison de la corde avec tout le système ne peut pas modifier le son qu'elle doit rendre d'après sa longueur et sa tension, car les points par lesquels elle touche les chevalets sont inévitablement des nœuds, et ces nœuds une fois déterminés, le son en est une conséquence nécessaire. Il faut donc que la caisse soit d'une telle substance et d'une telle

Digitized by Google

forme, qu'elle puisse instantanément prendre l'unisson de toutes les cordes dans tous leurs tons, et il faut en outre qu'elle puisse instantanément aussi imprimer ses vibrations à la masse d'air qu'elle contient, et par conséquent que cette masse d'air soit apte à les recevoir. Ces conditions multipliées font assez voir combien il est difficile de faire un bon instrument à cordes, et, par exemple, un bon violon; car, en supposant que la matière de la caisse vibre parfaitement bien, il pourra se faire que par sa forme la masse d'air qu'elle enveloppe reçoive mal ses vibrations, et que l'instrument manque de qualité.

Il suffit quelquefois d'un changement léger dans les pièces mobiles pour rendre un violon meilleur ou plus mauvais; car les vibrations passent de la corde à la table supérieure par le *chevalet*, et de la table supérieure à la table inférieure au moyen de l'*âme*. La position absolue de ces pièces et leur position relative ne peuvent donc manquer d'avoir de l'influence sur la facilité avec laquelle le son passe de la corde à la caisse et de la caisse à la masse d'air. Savart a fait des expériences variées et intéressantes pour montrer aux yeux par le mouvement du sable la transmission des vibrations dans les diverses pièces du violon, et il est parvenu ainsi à indiquer les fonctions principales que chacune d'elles doit remplir. Cependant la pièce la plus simple doit satisfaire à tant de conditions différentes, qu'il est à peu près impossible d'en faire une analyse exacte; et sans doute, si on voulait la changer pour mieux l'approprier à tel ou tel but, il est très-probable qu'elle deviendrait moins apte pour tel ou tel autre, et que l'on perdrait d'un côté au moins autant que l'on gagnerait de l'autre.

Digitized by Google

CHAPITRE VI.

De la Voix et de l'Ouïe.

59. De la voix humaine. — L'organe de la voix est composé de plusieurs parties dont la forme et l'arrangement ne peuvent être étudiés d'une manière complète que par des observations anatomiques. Nous devons donc nous borner à faire comprendre d'une manière générale la disposition des diverses pièces qui concourent plus directement à la production de la voix.

On sait que la *trachée-artère* est une espèce de tube qui se termine, d'une part, à l'arrière-bouche et de l'autre aux poumons. Sa principale fonction est de donner passage à l'air, soit dans l'*inspiration*, soit dans l'*expiration*. Ce tube est à peu près cylindrique et composé d'anneaux fermes et cartilagineux, séparés par des anneaux membraneux flexibles. A son extrémité inférieure, il se divise en deux tubes plus petits qui se portent l'un à droite et l'autre à gauche : on les appelle les *bronches ;* chaque bronche, à son tour, donne naissance à plusieurs divisions et subdivisions qui vont, dans tous les sens, se ramifier dans le tissu du poumon. A son extrémité supérieure, il se termine par le *larynx*, qui paraît être essentiellement l'organe de la voix.

Le *larynx* est composé de quatre cartilages : le *cricoïde*, le *thyroïde* et les deux *arithénoïdes*. Ces cartilages, de formes très-différentes, sont articulés entre eux et liés à l'anneau supérieur de la traché-artère. Plusieurs muscles sont disposés pour donner un mouvement à leur ensemble ou pour leur imprimer des mouvements relatifs. C'est l'arrangement de ces muscles, et surtout des derniers, qui donne à l'organe sa forme intérieure : ils s'attachent d'abord à droite et à gauche contre les parois intérieures du tube qui forme le prolongement de la trachée-artère, et diminuent de plus en plus son diamètre transversal, tellement qu'à la fin il ne reste plus qu'une fente qui se dirige d'arrière en avant, sans être horizontale, mais en s'élevant

assez rapidement; cette fente est ce que l'on nomme la *glotte :* elle a 25 à 30 millimètres de longueur; ses bords sont appelés les *lèvres* de la glotte; leur distance est très-petite en avant, mais en arrière elle est quelquefois de 7 ou 8 millimètres : au reste, cette distance est très-variable; il paraît que les lèvres de la glotte peuvent se presser au point de ne laisser en arrière qu'une très-petite ouverture. Au-dessus des lèvres de la glotte sont deux cavités, l'une à droite et l'autre à gauche, qui s'étendent latéralement à la profondeur de 25 et quelquefois 30 millimètres; elles ont 15 millimètres de hauteur, on les appelle *ventricules*. Les parois supérieures des ventricules se rapprochent de manière à former en quelque sorte une seconde glotte, à 15 ou 18 millimètres de hauteur au-dessus de la première. Enfin, il y a au-dessus du larynx une membrane ou plutôt un cartilage que l'on appelle *épiglotte;* il est fixé antérieurement par un de ses bords et peut s'abaisser sur la glotte.

Cette description sommaire du larynx nous permettra de comprendre les principes sur lesquels on s'appuie pour expliquer la formation de la voix.

Sans entrer ici dans le détail historique de toutes les explications plus ou moins vagues qui ont été données, nous nous contenterons de rapporter deux opinions entre lesquelles les physiciens semblent encore partagés. Les uns considèrent l'organe de la voix comme un instrument analogue aux instruments à anche; les autres le considèrent comme un instrument analogue aux réclames.

Pour assimiler le son de la voix au son d'*une anche*, on suppose que, pendant l'*expiration*, l'air poussé dans la trachée-artère, et pressé dans le passage étroit du larynx, ne peut pas sortir sans frotter les lèvres de la glotte et sans les mettre en vibration; ces lèvres, dit-on, vibrent alors comme la languette d'une anche; elles vibrent toutes deux, ce qui donne au son plus d'intensité : ensuite l'épiglotte, le pharynx, le voile du palais, les fosses nasales, la langue, les dents, l'ouverture de la bouche et la disposition des lèvres donnent au son, ainsi formé, un accent et un timbre particuliers, comme le tuyau d'écoulement de l'anche donne, suivant sa forme, un timbre particulier au son qui résulte des vibrations de la languette. Le son restant le même, quant à l'intensité et au ton, pourra recevoir des modifications sans nombre, dans l'accent et le timbre, parce

que toutes les pièces dont nous venons de parler peuvent elles-mêmes être modifiées, par la volonté, d'une infinité de manières. Un seul son une fois expliqué, toutes les nuances des sons que la voix humaine peut produire s'expliquent aisément; car un petit mouvement de la rasette change la longueur de la languette, et fait rendre à l'anche ordinaire un son plus grave ou plus aigu; il suffit donc de donner aux lèvres de la glotte un peu plus ou un peu moins de tension, pour que la voix parcoure successivement plusieurs octaves ascendantes ou descendantes; et même, ajoute-t-on, nous avons pour cela deux moyens, car nous pouvons non-seulement changer la tension des lèvres de la glotte, mais nous pouvons encore changer leur longueur, puisque l'ouverture de la glotte est tellement faite qu'il suffit d'un acte de la volonté pour l'agrandir ou pour la fermer complétement.

Ces considérations ingénieuses semblent fortifiées par quelques expériences directes. M. Magendie a mis le larynx à découvert sur des chiens vivants, et il a vu les lèvres de la glotte entrer en vibration dès que ces animaux poussaient des cris ; il a pu constater aussi, dans les mêmes expériences, que les lèvres de la glotte se rapprochent pour les sons aigus, et qu'elles restent au contraire plus ou moins éloignées pour les sons graves. Plusieurs observateurs ont fait des expériences analogues sur des larynx d'animaux récemment privés de la vie : en soufflant avec un fort soufflet dans la trachée-artère, ils ont obtenu des sons plus ou moins analogues à ceux que pouvaient rendre ces animaux.

Pour assimiler le son de la voix aux sons des *réclames*, on regarde les ventricules du larynx comme une espèce de tambour rempli d'air, et les deux glottes comme deux ouvertures correspondantes pratiquées dans les deux bases de ce tambour; ainsi les ventricules et les deux glottes forment un véritable réclame. L'air poussé par les poumons dans la trachée, sort avec plus ou moins de vitesse par le larynx; il entraîne dans son mouvement une partie de l'air des ventricules, et bientôt la pression étant devenue trop faible, l'air extérieur se précipite dans les cavités des ventricules; puis il est de nouveau entraîné au dehors, etc., exactement comme dans les réclames. Ces alternatives produisent un son plus ou moins aigu, suivant la rapidité avec laquelle elles se succèdent. Dans cette hypothèse, comme

dans la précédente, l'accent et le timbre dépendent des vibrations des lèvres de la glotte, et de toutes les parties qui peuvent prendre diverses formes ou divers mouvements, depuis l'arrière-bouche jusqu'aux lèvres.

Les sons différents seront produits, soit par diverses formes que les cavités des ventricules peuvent prendre, soit par diverses dimensions des ouvertures de la glotte, soit enfin par divers degrés de tension dans les lèvres de la glotte et dans toutes les parties du larynx et de l'arrière-bouche. Savart a fait plusieurs expériences qui semblent fortifier cette hypothèse. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXX, p. 64.)

Ces deux opinions paraissent sans doute plus différentes qu'elles ne le sont en effet; mais, quoique liées par des rapports intimes, elles ne peuvent pas encore dans leur ensemble donner une explication complète du phénomène de la voix. On doit les considérer comme de simples aperçus moins propres à résoudre la question qu'à en montrer toutes les difficultés.

60. De la voix des oiseaux. — Chez les animaux, l'organe de la voix n'est pas à l'arrière-bouche, mais il se trouve au contraire à l'extrémité inférieure de la trachée, là où elle se bifurque pour donner naissance aux bronches. Cuvier a fait voir, en effet, qu'un canard qui vient d'avoir la tête tranchée pousse encore pendant quelques instants des cris très-forts et très-bien articulés; et la même expérience peut être faite sur la plupart des oiseaux. L'observation anatomique confirme ce résultat; car, en suivant l'organisation de la trachée, on trouve qu'à son extrémité supérieure elle se termine par un simple rétrécissement, ou par une espèce de glotte qui n'offre aucune des dispositions nécessaires à la production des sons; tandis qu'à son extrémité inférieure elle présente un appareil très-complexe et merveilleusement ajusté pour produire une longue série de sons graves et aigus : mais, comme il nous serait impossible d'en donner une idée sans entrer dans des détails anatomiques qui nous écarteraient trop de notre plan, et comme, d'une autre part, il se présente encore de grandes difficultés dans les théories qui ont été proposées jusqu'à présent pour expliquer tous les phénomènes qui résultent de cette organisation, nous nous contenterons de renvoyer aux ouvrages qui ont été publiés sur ce sujet, et particulièrement aux mémoires de Savart. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXII.)

Digitized by Google

61. De l'organe de l'ouïe. — La seule partie extérieure de cet organe est le pavillon *a* (Pl. 30, Fig. 32 et 33), dont les replis et les contours ne sont, comme on sait, que l'épanouissement du *conduit auditif* *b*. Ce conduit, après s'être enfoncé à une petite profondeur, est terminé obliquement par une membrane mince, mobile et élastique *c*, que l'on appelle la *membrane du tympan*. Derrière cette membrane est la *caisse du tympan;* c'est une cavité osseuse, tapissée de diverses membranes et remplie d'air; elle est fermée de toutes parts, excepté en un point où aboutit la *trompe d'Eustache* qui part de l'arrière-bouche; par ce moyen l'air peut se renouveler et se mettre sans cesse en équilibre avec la pression atmosphérique. On distingue encore dans la caisse du tympan deux ouvertures fermées par des membranes, savoir : la *fenêtre ovale* en haut *v*, et plus bas la *fenêtre ronde*. Enfin, dans l'intérieur même de cette caisse est suspendue la *chaîne des osselets*, qui se compose de quatre petits os irréguliers, que l'on appelle par analogie de forme le *marteau*, l'*enclume*, le *lenticulaire* et l'*étrier*, *m*, *e*, *l*, *t* (Fig. 35). Le marteau est attaché longitudinalement sur la membrane du tympan (Fig. 32 et 34); il forme une espèce de rayon solide, qui vient de la circonférence au centre. A son autre extrémité il se lie à l'enclume, l'enclume au lenticulaire, et le lenticulaire à l'étrier, qui va s'attacher sur la membrane de la fenêtre ovale (Fig. 32) : plusieurs muscles agissent sur cette chaîne pour la tendre ou la relâcher, et, par conséquent, pour tendre et relâcher en même temps la membrane du tympan et celle de la fenêtre ovale. La membrane de la fenêtre ronde sépare la caisse du tympan d'un conduit osseux *s*, contourné en spirale, qui se nomme le *limaçon;* l'autre extrémité de ce conduit s'ouvre dans une cavité qui s'appelle le *vestibule*. Le vestibule est séparé de la caisse du tympan par la membrane de la fenêtre ovale; enfin il communique avec trois canaux osseux, que l'on nomme canaux semi-circulaires, et qui sont remplis d'une matière grisâtre dont l'usage est inconnu.

Le vestibule et les spires du limaçon sont remplis par le *liquide de Cotunni*, dans lequel viennent flotter les derniers filets du *nerf acoustique* *n* (Fig. 33).

D'après cette disposition de l'organe, on peut remarquer d'abord que, si la trompe d'Eustache n'établissait pas une communication libre entre l'air de l'arrière-bouche et celui de la

Digitized by Google

caisse du tympan, il y aurait des inégalités de tension qui donneraient à la membrane du tympan des pressions différentes : cette circonstance est en général accompagnée de bourdonnements plus ou moins incommodes.

En supposant que la membrane du tympan ait une tension convenable, on conçoit qu'elle entre en vibration dès qu'une onde sonore vient la frapper, et si plusieurs ondes viennent la frapper à la fois, elle se met à l'unisson avec chacune d'elles, comme ferait une membrane inerte; ces vibrations *coexistantes* sont faciles à concevoir, d'après ce que nous avons dit précédemment. Ce fait est à peu près tout ce que l'on sait de certain sur le phénomène de l'audition.

Comment ces vibrations sont-elles transmises au nerf acoustique? Quels rôles jouent dans cette transmission la chaîne des osselets, le limaçon et les canaux semi-circulaires? Ces questions restent sans solution, ainsi que beaucoup d'autres que l'on peut se proposer sur ce sujet.

On sait cependant que la membrane du tympan peut être enlevée, et même que la chaîne des osselets peut être rompue sans que l'organe cesse de remplir ses fonctions; on sait pareillement, d'après les expériences de Savart, confirmées par celles de M. Muller, que la chaîne des osselets peut servir à modérer l'effet des sons trop déchirants, ou en général à faire varier la sensibilité de l'organe en faisant varier la tension de la membrane du tympan : car, si l'on écoute un son avec un cornet acoustique muni d'une membrane *m* (Fig. 31), on constate qu'il suffit de changer la tension de cette membrane pour augmenter ou diminuer la vivacité de la sensation. C'est là sans doute une fonction importante de la chaîne des osselets; mais elle ne suffit pas pour justifier complétement sa forme ; il est probable qu'elle a encore d'autres usages.

Digitized by Google

LIVRE SIXIÈME.

OPTIQUE.

Notions générales sur la propagation de la lumière.

62. Les observations les plus familières nous apprennent qu'un *corps lumineux* quelconque émet de la lumière dans tous les sens : la flamme d'une bougie, par exemple, serait visible de tous les points d'une sphère dont elle occuperait le centre; il en serait de même d'un corps phosphorescent, ou d'une étincelle électrique. Ce qui se montre en petit, dans nos expériences habituelles, se manifeste en grand dans l'immense étendue du ciel : le soleil répand de toutes parts le même éclat dans l'espace, et sa lumière brille à la fois sur la terre, sur les planètes, sur les comètes, et sur tous les corps du firmament, quel que soit le point qu'ils occupent dans la sphère infinie du monde.

Les corps lumineux sont essentiellement composés de matière pondérable; le *vide*, tel que nous l'avons défini, peut bien propager la lumière, mais non lui donner naissance; il en résulte que les corps lumineux peuvent être divisés en fragments pondérables de plus en plus petits, et les derniers fragments que nous puissions physiquement concevoir sont ce que l'on appelle des *points lumineux*. Ainsi, comme un corps ordinaire est une réunion de molécules ou d'atomes, un corps lumineux est une réunion de points lumineux.

63. Dans un milieu homogène la lumière se propage toujours en ligne droite. — En disposant sur une longue règle trois disques percés en leur centre d'un trou très-petit, on voit à une grande distance la flamme d'une bougie, ou bien on cesse de l'apercevoir, suivant que les trous sont ou ne sont pas en ligne droite. On conçoit qu'il puisse y avoir divers moyens, indépendants de la lumière, pour s'assurer que trois points sont en ligne droite.

Quand la lumière vient rencontrer une glace polie ou un miroir

de métal *mm'*, suivant la direction *li*, par exemple (Pl. 32, Fig. 1), elle est renvoyée suivant une autre direction *ik*, et continue de se mouvoir en ligne droite suivant cette nouvelle direction tant qu'elle reste dans un milieu sensiblement homogène.

Cette déviation que la lumière éprouve en tombant sur des surfaces polies, s'appelle la *réflexion* de la lumière.

64. Dans un milieu hétérogène la lumière se meut toujours en ligne courbe. — Quand la lumière passe de l'eau dans l'air ou de l'air dans l'eau, la *déviation* qu'elle éprouve est frappante; pour s'en assurer, il suffit de prendre un vase *v* (Fig. 2), de placer l'œil en *o* de manière que l'on aperçoive à peine le contour d'une pièce de monnaie *m*, le reste étant caché par le bord *b*, et de verser ensuite de l'eau dans le vase. A mesure que le niveau s'élève, la pièce *m* semble s'avancer vers le centre, et l'on parvient enfin à l'apercevoir dans toute sa largeur, quoique en réalité elle continue d'être cachée par le bord du vase. Donc, la lumière ne vient pas en ligne droite de la pièce *m* vers l'œil : mais elle se propage en ligne droite dans l'eau et en ligne droite dans l'air, car chacun de ces milieux est sensiblement homogène dans une si petite épaisseur, et nous démontrerons plus tard qu'elle suit alors une *ligne brisée* analogue à *mio*.

Au moyen de l'air atmosphérique, nous voyons déjà les astres avant leur lever, et nous les voyons encore après leur coucher; c'est un résultat analogue au précédent, car nous apercevons la pièce *m* au moyen de l'eau, bien qu'elle soit cachée par le bord du vase comme le sont les astres par les montagnes ou les plaines qui limitent notre horizon. Il y a seulement cette différence qu'en traversant les couches successives de l'atmosphère, la lumière, ne rencontrant pas de changements brusques de densité, ne se brise pas brusquement, comme elle fait en passant de l'eau dans l'air, et alors elle suit une ligne courbe au lieu d'une ligne brisée.

Cette déviation que la lumière éprouve en traversant des milieux hétérogènes s'appelle *réfraction*.

65. Un *rayon lumineux* est la direction que suit la lumière en se propageant. — Un *pinceau* est la réunion de plusieurs rayons voisins. — Un *faisceau* est la réunion de plusieurs rayons ou de plusieurs pinceaux voisins ou séparés.

Si d'un point quelconque de la flamme d'une bougie l'on

conçoit des lignes droites dans toutes les directions, suivant chacune de ces lignes droites il y aura un rayon de lumière, puisque la lumière se propage dans tous les sens et en ligne droite : mais lorsqu'on s'éloignera assez de la flamme pour que le milieu devienne sensiblement hétérogène, les rayons de lumière commenceront à se courber, et leurs directions ne seront plus représentées par les prolongements des lignes droites primitives.

Quand la lumière se propage dans un milieu homogène autour d'un point lumineux et qu'on la reçoit sur une surface quelconque, l'on a coutume de dire que cette surface est éclairée par un pinceau lumineux quand elle est petite, et par un faisceau lumineux quand elle est plus grande. Alors on regarde cette surface comme la base d'un cône dont le point lumineux est le sommet, et la lumière du pinceau ou du faisceau est la lumière comprise dans ce cône. Mais, quand la lumière passe dans un milieu hétérogène, tous les rayons d'un même faisceau commencent à se propager suivant des lignes courbes, et en général suivant des lignes courbes différentes; alors, il n'est plus vrai de dire que le faisceau est un cône droit.

Un pinceau ou faisceau de lumière est naturellement *divergent*, c'est-à-dire que sa section est d'autant plus grande qu'elle s'éloigne davantage du point lumineux. Cependant, quand le point lumineux est très-éloigné, on dit que le faisceau est *parallèle*, parce que toutes les sections sont sensiblement égales, ou, ce qui revient au même, tous les rayons sont sensiblement parallèles. Ainsi, par exemple, la lumière que nous envoie le centre du disque du soleil forme un faisceau parallèle; car deux lignes qui sont à la surface de la terre distantes de quelques centimètres, ou même de quelques kilomètres, et qui vont se rencontrer au centre du soleil, sont deux lignes parallèles.

Les faisceaux de lumière naturelle, convenablement modifiés, peuvent devenir des *faisceaux convergents*, c'est-à-dire que les rayons sont ramenés dans une telle direction qu'ils concourent tous au même point. Ce point de concours de tous les rayons d'un faisceau se nomme un *foyer*. Mais c'est une chose digne de remarque, qu'après s'être ainsi rassemblés et concentrés en un foyer, tous les rayons continuent leur route, comme si chacun d'eux était seul, d'où il suit qu'au delà du foyer le faisceau devient divergent, comme un faisceau naturel.

66. **L'intensité de la lumière d'un point lumineux décroît**

Digitized by Google

comme le carré de la distance augmente. — On sait que les sections *ab* et *a'b'* d'un cône droit (Fig. 3) sont entre elles comme les carrés des distances au sommet *sc* et *sc'* : *sc'* étant, par exemple, double de *sc*, la section *a'b'* sera quadruple de la section *ab*. Or, ce cône étant un faisceau lumineux, il est évident que la lumière qui passe en *ab* est la même que celle qui passe en *a'b'*, et, puisqu'ici elle est répandue sur un espace quadruple, elle doit en éclairer chaque partie avec une intensité quatre fois moindre.

Cette proposition ne s'applique pas rigoureusement à un corps lumineux d'une grande étendue, dont on recevrait la lumière à de petites distances. Car le point *s'* n'éclaire pas *ab* tandis qu'il éclaire *a'b'*, et les points qui seraient compris entre *s'* et *s* enverraient tous en *a'b'* plus de lumière qu'en *ab*; par conséquent un corps lumineux qui s'étendrait de *s* à *s'* donnerait sur *ab* un éclat qui ne serait pas quadruple de celui qu'il donnerait sur *a'b'*.

67. Les corps qui ne sont pas lumineux par eux-mêmes se distinguent en *corps opaques*, comme le bois, la pierre et les métaux; *corps diaphanes* ou *transparents*, comme l'air, l'eau et le verre; et *corps translucides*, comme le papier mince et le verre dépoli.

Les *corps opaques* ne transmettent point de lumière au travers de leur masse : mais l'opacité est toujours dépendante de l'épaisseur; tous les corps réduits en lames ou en feuilles assez minces laissent passer une partie de la lumière qu'ils reçoivent; ainsi, au travers d'une feuille d'or collée sur du verre, on distingue une lueur verdâtre très-sensible, lorsqu'on regarde une bougie ou même la lumière du ciel ou des nuées.

Les *corps diaphanes* transmettent la lumière et laissent apercevoir nettement au travers de leur substance toutes les formes des objets. Les gaz, les liquides et la plupart des corps cristallisés semblent, en général, avoir une diaphanéité parfaite lorsqu'ils sont en petite masse; car ils sont absolument incolores, et ils laissent apercevoir non-seulement les formes des objets, mais encore toutes les nuances de leurs couleurs. Cependant les plus diaphanes de ces corps deviennent colorés quand ils ont une épaisseur suffisante, et c'est une preuve qu'ils absorbent alors une partie de la lumière qui les traverse. Ainsi une goutte d'eau est parfaitement limpide, tandis que l'eau prise en masse est d'un vert bleuâtre très-éclatant.

Digitized by Google

Les *corps translucides* laissent passer une partie de la lumière qu'ils reçoivent, mais ils ne laissent distinguer ni la couleur, ni la distance, ni la forme des objets. Dans le langage ordinaire, le mot *transparent* s'applique souvent aux corps translucides comme aux corps diaphanes.

68. Ombre et pénombre. — Quand un corps opaque est éclairé par un seul point lumineux, la forme de l'ombre qui en résulte est facile à trouver : en effet, si l'on conçoit une ligne droite qui passe par le point lumineux et qui fasse une révolution autour du corps en s'appuyant sans cesse sur son bord, cette ligne décrit une espèce de surface conique dont le prolongement au delà du corps donne la trace du contour de l'ombre (Fig. 4). Nous devons prévenir cependant que cette *ombre géométrique* ne coïncide jamais avec l'*ombre physique*, parce que la lumière *se diffracte* ou semble *s'infléchir* en passant près des limites des corps, et l'effet de cette diffraction est toujours de faire paraître de la lumière dans une partie plus ou moins grande de l'ombre géométrique, et de faire paraître, au contraire, de l'ombre au dehors.

Ce qui précède s'applique à un assemblage quelconque de points lumineux; mais alors on distingue l'*ombre* de la *pénombre*. L'ombre est encore le lieu de l'espace qui ne reçoit aucune lumière, et la pénombre est l'ensemble des lieux qui sont dans l'ombre par rapport à quelques-uns des points éclairants, tandis qu'ils reçoivent la lumière des autres.

La lumière qui pénètre par une petite ouverture dans une chambre noire, c'est-à-dire dans un espace exactement fermé de toutes parts, présente aussi des phénomènes d'ombre et de pénombre. Par exemple, v (Fig. 5) étant la petite ouverture pratiquée au volet, le faisceau qui vient du point lumineux s et qui pénètre dans la chambre, est un cône indéfini, ayant s pour sommet et v pour base. La surface de ce cône est la limite géométrique qui sépare la lumière de l'ombre absolue; mais dans ce cas, comme dans le précédent, l'ombre physique est loin de coïncider avec l'ombre géométrique, car on observe de la lumière au dehors du cône et de l'ombre au dedans. Pour prendre une idée plus nette de ce phénomène de diffraction, supposons que l'ouverture soit circulaire et de 2 ou 3 millimètres de diamètre, que le point lumineux n'envoie que de la lumière rouge, et qu'on aille présenter au faisceau un grand tableau

Digitized by Google

blanc *t* à 2 ou 3 mètres dans l'intérieur de la chambre; alors, au lieu d'avoir sur ce tableau *t* une tache circulaire rouge environnée d'ombre complète, telle qu'elle est en *b* sur le tableau rabattu, on aura, au contraire, des anneaux alternativement rouges et noirs, soit au dedans, soit au dehors de la base géométrique du cône de lumière, comme on le voit en *b'*. Quand le point lumineux envoie de la lumière blanche ordinaire, alors, au lieu de ces alternatives d'ombre et de lumière, on distingue simplement des anneaux colorés, où diverses nuances se succèdent à de petits intervalles. Une ouverture très-grande produit encore des phénomènes analogues, mais seulement à une petite distance autour de la limite géométrique de l'ombre. Cependant nous devons pour le moment faire abstraction de ces effets remarquables, et supposer d'abord que la lumière se propage géométriquement en ligne droite, sans être modifiée ou diffractée près des limites des corps.

Dans cette hypothèse, chaque point lumineux donnant un faisceau brusquement séparé de l'ombre, il est clair que plusieurs points lumineux, tels que *s*, *s'*, *s"* (Fig. 6), donneraient dans la chambre noire des faisceaux qui se propageraient comme s'ils étaient seuls, et qu'il en résulterait des espaces diversement éclairés. En *e*, par exemple, il arriverait des rayons des trois points lumineux, plus loin des rayons de deux points seulement, en *d*, des rayons d'un seul point; et les espaces *c* seraient complétement dans l'ombre, comme les espaces extérieurs à *b*, *b'*.

Mais, si l'on suppose que *s's"* est le diamètre d'un disque dont tous les points soient également lumineux, il y aura dans la chambre noire un grand faisceau *bb'* composé d'un nombre infini de faisceaux venant chacun d'un point différent, et le cercle dont *bb'* est le diamètre se trouvera inégalement éclairé dans tous ses points. Pour savoir, par exemple, quelle est la lumière qui arrive en *k*, il faut alors regarder ce point comme le sommet d'un cône ayant pour base l'ouverture *v*, et tous les points du disque lumineux que ce cône prolongé vient envelopper donnent de la lumière au point *k*, les autres n'en donnent pas.

Cette construction peut s'appliquer au disque du soleil; seulement, au lieu d'un faisceau conique, chaque point de cet astre envoie un faisceau parallèle (Fig. 7) : *c* est le faisceau envoyé

par le centre, *s* le faisceau envoyé par le bord supérieur, et *s'* le faisceau envoyé par le bord inférieur. L'angle *sos'* est de 32' environ, car c'est sous cet angle que nous apercevons le disque du soleil. Un point *k* étant donné sur une section *bb'* du faisceau de la chambre noire, il est facile, d'après ce que nous venons de dire, de déterminer quels sont les points du soleil dont il reçoit des rayons; et l'on calculerait aisément à quelle distance du volet le point central *m* ou tout autre point cesse de recevoir les rayons des bords.

Les esprits les moins attentifs ne manquent pas d'observer une foule de phénomènes qui s'expliquent au moyen des notions précédentes. Nous en indiquerons ici quelques exemples.

1° Lorsqu'on fait entrer dans la chambre noire un faisceau de lumière solaire par une petite ouverture de forme quelconque, ce faisceau donne toujours une image parfaitement ronde, en tombant perpendiculairement sur un tableau à une distance suffisante du volet. Supposons, par exemple, que l'ouverture soit un carré *a* (Fig. 8) : chaque point du soleil donne dans la chambre noire un faisceau carré dont la section perpendiculaire est partout égale à *a*, et, pour avoir le contour de l'image, il suffit de concevoir que l'un de ces faisceaux tourne dans l'ouverture en s'appuyant sur les bords de l'astre. Ainsi, quand l'image sera reçue à une distance assez grande par rapport à la grandeur de l'ouverture, son contour extérieur sera toujours semblable au contour extérieur du corps lumineux, quelle que soit la forme de l'ouverture. Pendant une éclipse, l'image du soleil dans la chambre noire est tantôt annulaire, tantôt en forme de croissant, etc.; elle est toujours parfaitement semblable à la portion du disque qui n'est pas cachée. Des phénomènes analogues peuvent s'observer sous les ombrages des arbres touffus et élevés : les rayons qui passent entre les feuilles viennent peindre sur le sol des images *elliptiques* du soleil, quand ils tombent obliquement, et des images rondes, quand ils tombent perpendiculairement; au moment des éclipses, ces images prennent aussi différentes formes, suivant l'obliquité du sol.

2° Pendant une belle nuit, toutes les étoiles qui brillent dans la voûte du ciel vont peindre leurs images dans l'intérieur d'une chambre noire dont l'ouverture est très-petite. Chaque étoile, en effet, donne un faisceau parallèle, dont toutes les sections parallèles au volet sont égales à l'ouverture; ces faisceaux, en

tombant sur une surface blanche avec des obliquités différentes, donnent des images dont le contour et la grandeur sont faciles à déterminer.

3° Pendant le jour on distingue dans l'intérieur de la chambre noire une image renversée du ciel, des nuages, de l'horizon et de tous les objets qui sont au-dessus de la petite ouverture. Chaque point d'un arbre, par exemple, envoie un faisceau sensiblement parallèle, dont la section est de 1 millimètre si l'ouverture n'a que 1 millimètre de diamètre. Ainsi, sur le mur ou sur le tableau de la chambre noire, les faisceaux *a* et *b* de deux points voisins (Fig. 9) se superposent en partie et d'autant plus que le tableau est plus près de l'ouverture : tandis que les faisceaux *a* et *c* de deux points un peu éloignés se dégagent l'un de l'autre pour former des images distinctes de ces points. On aura donc une image renversée de l'ensemble, qui sera toujours un peu confuse vers les bords, mais d'autant moins que l'ouverture sera plus petite et le tableau plus éloigné. On voit, en même temps, sur la figure même, la cause du renversement.

69. Les notions précédentes peuvent nous donner une première idée du phénomène de la vision. L'œil, comme nous le verrons, est un appareil analogue à une chambre noire : l'ouverture de la *pupille* donne passage aux faisceaux de lumière, et le réseau nerveux de la *rétine* qui tapisse le fond de l'œil, est comme le tableau sur lequel viennent se peindre les images : mais, pour qu'un seul point d'un objet extérieur n'ébranle qu'un seul point de la rétine, il y a, derrière la pupille, un corps de forme lenticulaire et presque solide, nommé *cristallin*, qui concentre les rayons d'un même faisceau et les fait converger tous exactement sur le même point de la rétine. Ainsi, quand nous regardons un corps éloigné, nous voyons chacun de ses points par deux cônes de lumière, opposés par leur base : le premier de ces cônes est *divergent*, son sommet est au point que l'on regarde, et sa base a pour largeur l'ouverture de la pupille ; le deuxième est *convergent;* et pour que la vision soit parfaitement nette, son sommet doit tomber exactement sur la rétine. C'est par cette disposition organique, si simple dans son principe et si merveilleuse dans ses détails, que tous les objets du plus vaste paysage viennent dans un instant imperceptible se peindre à la fois sur la rétine, avec toutes les variétés de leurs formes et tout l'éclat de leurs couleurs.

Comme nous jugeons de la situation d'un point dans l'espace par le lieu de son image sur la rétine et par la direction que nous donnons à l'œil pour la recevoir, il en résulte que par une habitude constante nous supposons toujours que le point dont les rayons nous affectent est situé au sommet extérieur du cône qui peut *directement* donner naissance au cône intérieur de lumière. Ce principe habituel de nos jugements est la source de toutes les *illusions* d'optique qui tiennent à la situation des objets. Ainsi, le point *a* (Fig. 10) fait son image au point *a'* au moyen des deux cônes opposés *pap'* et *pa'p'*. Mais, si la lumière, au lieu de venir à l'œil en ligne droite, se trouve brisée ou déviée par quelque cause, un point placé en *b*, par exemple, ou en *c*, pourrait donner naissance au même cône intérieur *pa'p'* et à la même image *a'*, et alors nous jugerions faussement que ces points sont en *a*, sans qu'il y ait aucune donnée pour faire cesser notre illusion ; car, les faisceaux de lumière des points *c* et *b* venant enfin se confondre dans leur direction avec le faisceau qui serait parti du point *a*, rien ne peut nous avertir des divers changements de route qu'ils ont pu subir. Il est donc vrai de dire que, par l'organe de la vue, *nous jugeons toujours en ligne droite*, et que nos jugements sont inévitablement faux toutes les fois que la lumière éprouve la plus légère déviation entre l'objet qui l'envoie et l'œil qui la reçoit.

70. La lumière se propage avec une si grande vitesse qu'elle vient du soleil à la terre en 8′ 13″. — C'est par l'observation des éclipses du premier satellite de Jupiter que Roemer fut conduit à cette importante découverte en 1675 et 1676, car il ne fallut pas moins d'une année pour la bien constater. La figure 11 pourra donner une idée de ces observations : *s* est le lieu du soleil, *tabmcd* l'orbite de la terre, et *j* la position de Jupiter. Supposons que Jupiter soit dans le plan de l'écliptique comme il est représenté dans la figure, qu'il reste immobile pendant une révolution entière de la terre, et que le premier satellite tourne dans le cercle *eigh* ; ce cercle, le diamètre de Jupiter et le cône d'ombre qu'il projette derrière lui, sont ici fort amplifiés. Pendant une moitié de l'année, quand la terre parcourt la partie *tabm* de son orbite, nous pouvons observer les *émersions* du premier satellite, c'est-à-dire le moment où il sort de l'ombre, et pendant l'autre moitié nous pouvons observer ses *immersions*, c'est-à-dire le moment où il se plonge dans

l'ombre. L'intervalle de deux immersions ou de deux émersions successives est la durée d'une révolution. Quel que soit le point de l'orbite de la terre d'où l'on fasse les observations, cette durée est toujours de $42^h\ 28'\ 35''$ ou environ $42^h\ \frac{1}{2}$. Par conséquent, si du point *a*, par exemple, on observe une émersion, à un instant donné, on peut prédire que la 100[e] émersion suivante aura lieu précisément après 100 fois $42^h\ 28'\ 85''$, et qu'elle sera vue du point *b* où le globe de la terre sera alors parvenu par son mouvement de translation. Or, on trouve par expérience qu'elle arrive toujours *un peu plus tard*, et l'on en conclut que la différence est le temps que met la lumière pour passer de *a* en *b*; on en déduit la vitesse de propagation, en divisant la distance connue *ab* par le retard observé. Cette conclusion se trouve vérifiée pendant la seconde moitié de l'année; car si l'on observe une immersion du point *c*, par exemple, la 100[e] immersion suivante devrait avoir lieu après 100 fois $42^h\ 28'\ 35''$, quand le globe de la terre serait parvenu en *d*. Or, on trouve par l'expérience qu'elle arrive *un peu plus tôt*, et cette *avance* est précisément le temps que met la lumière pour passer de *d* en *c*. C'est par des observations semblables et souvent répétées que l'on a pu constater enfin que la lumière parcourt en $1''$ près de 80 000 lieues ou 79 572 lieues de 4000 mètres, et qu'elle met $8'\ 13''$ à venir du soleil à la terre.

Il est facile d'après cela de calculer le temps que met la lumière pour aller du soleil aux diverses planètes. Ces résultats se trouvent dans la troisième colonne du tableau suivant, qui contient l'ensemble des éléments de notre système planétaire.

Les 20 petites planètes nouvelles qui sont inscrites sur ce tableau se trouvent à des distances du soleil comprises entre 2,27 et 3,18; ainsi, en prenant le soleil pour centre commun de deux sphères dont l'une aurait pour rayon un peu plus du double et l'autre un peu plus du triple de la distance du soleil à la terre, et en concevant dans l'intervalle compris entre ces deux sphères une bande de 30 et quelques degrés de largeur de part et d'autre de l'écliptique, on aura le vaste champ où se meuvent toutes les planètes télescopiques. Leur dénombrement est encore fort incomplet, car chaque année on en découvre de nouvelles : 8 en 1852, 4 en 1853, 6 en 1854; il en manque 13 au tableau suivant, savoir : *Polymnie* découverte par Chalornac, *Euphrosine* par Fergusson, *Amphitrite* par Marth, *Psyché* et *Thémis* par de Gasparis, *Lutetia* et *Pomone* par Goldschmidt, *Thétis*, *Proserpine* et *Bellone* par Luther, *Calliope*, *Thalie* et *Urania* par Hind qui pour sa part en a découvert 10.

Digitized by Google

Éléments de notre Système planétaire.

NOMS des PLANÈTES.	Distances moyennes au Soleil	Temps que met la lumière pour aller du Soleil aux Planètes.	Durée des révolutions sidérales.	Diamètres réels.	Volumes.	Masses.	Densité.
		h ′ ″	jours.				
Mercure...	0,39	0 3 12	87,97	0,39	0,06	0,18	3,00
Vénus.	0,72	0 5 55	224,70	0,98	0,96	0,88	0,92
La Terre...... .	1,00	0 8 13	365,26	1,00	1,00	1,00	1
Mars.	1,52	0 12 29	686,98	0,52	0,14	0,13	0
Flore (1847).....	2,20	0 18 27	1193,00	»	»	»	»
Melpomène (1852).	2,29	»	1270,50	»	»	»	»
Victoria (1850)...	2,33	0 19 9	1303,03	»	»	»	»
Vesta (1807).....	2,36	0 19 21	1325,67	»	»	»	»
Euterpe (1853)...	2,37	»	1332,30	»	»	»	»
Massalia (1852)..	2,37	»	1337,60	»	»	»	»
Iris (1847)......	2,38	0 19 33	1345,35	»	»	»	»
Métis (1848).....	2,39	0 19 38	1346,47	»	»	»	»
Phocea (1853)...	2,39	»	1350,28	»	»	»	»
Hébé (1847).....	2,43	0 19 58	1380,49	»	»	»	»
Fortuna (1852)...	2,44	»	1397,49	»	»	»	»
Parthenope (1850).	2,45	0 20 8	1397,72	»	»	»	»
Astrée (1845)....	2,58	0 21 12	1511,18	»	»	»	»
Égérie (1850)....	2,58	0 21 12	1512,91	»	»	»	»
Irène (1851).....	2,58	0 21 12	1515,48	»	»	»	»
Eunomia (1851)..	2,65	0 21 27	1579,94	»	»	»	»
Junon (1804)....	2,67	0 21 36	1592,91	»	»	»	»
Cérès (1801).....	2,77	0 22 9	1681,40	»	»	»	»
Pallas (1802).....	2,77	0 22 9	1690,09	»	»	»	»
Hygie (1849).....	3,18	0 26 8	2074,88	»	»	»	»
Jupiter..........	5,20	0 42 30	4332,58	11,22	1414,20	338,00	0,2
Saturne.........	9,54	1 18 23	10759,22	9,02	734,80	101,41	0,14
Uranus.	19,18	2 37 28	30686,82	4,34	82,00	14,80	0,18
Neptune (1845)...	30,04	4 6 50	60127,00	4,80?	111,00?	19,80	0,18

Terre.

Rayon de l'équateur.	6 376 984	mètres;	environ	6377	kilomètres.
» des pôles....	6 356 324	»	»	6356	»
Différence.........	20 660	»	»	21	»
Rayon moyen......	6 366 745	»	»	6367	»

Distance moyenne de la terre au soleil, 24 000 rayons terrestres ou 152 millions de kilomètres.

Distance moyenne de la terre à la lune, 60 rayons terrestres ou 338 000 kilomètres.

Soleil.

Diamètre.	112 diamètres terrestres.	
Volume. .	1 407 124 fois celui de la terre, ou 1 million de fois et demi.	
Masse....	354 946 fois celle de la terre, ou 355 000 fois.	
Densité. .	0,25 »	ou $\frac{1}{4}$ de celle de la terre.

Digitized by Google

Lune.

Diamètre.	0,264 de celui de la terre, ou 3350 kilomètres.
Volume. .	0,018 » »
Masse. . . .	$\frac{1}{88}$ de celle de la terre.
Densité. .	0,62.

Le temps que la lumière emploie pour venir, par exemple, de Neptune à la terre, est tantôt moindre, tantôt plus grand que 4h 6′ 50″, suivant les positions relatives de ces deux planètes; mais l'on peut dire, sans trop s'écarter de la vérité, que l'astronome qui regarde le globe de Neptune le voit où il était 4h auparavant, et que si cette planète était anéantie à un instant donné, on la verrait encore pendant 4h après qu'elle aurait cessé d'être.

Nous ne savons pas à quelle distance de la terre sont dispersées les étoiles, mais nous savons avec certitude qu'il n'y a pas un de ces astres qui ne soit au moins à 200 000 fois la distance du soleil à la terre; par conséquent, pour arriver à nous, leur lumière met au moins 200 000 fois 8′ 13″, c'est-à-dire 1141 jours, ou 3 ans 45 jours; sans doute il n'y a pas d'exagération à supposer que nous voyons des étoiles qui sont quelques milliers de fois plus éloignées et dont la lumière met par conséquent plusieurs siècles à venir jusqu'à nous. Tout ce qui existe dans le ciel, au delà de notre système, pourrait être brisé, confondu, anéanti, et nous, habitants paisibles de la terre, nous passerions encore de nombreuses années à contempler comme aujourd'hui ce grand spectacle d'ordre et de magnificence qui ne serait plus qu'une illusion trompeuse, une image sans réalité.

La matière pondérable paraît par sa nature n'être pas susceptible d'un mouvement aussi rapide que le mouvement de la lumière.

71. Pour entrer maintenant dans l'étude de l'optique, c'est-à-dire dans l'étude des modifications diverses que les corps peuvent imprimer à la lumière, nous distinguerons les propriétés qui sont relatives seulement à la direction des faisceaux lumineux, et celles qui sont essentielles aux rayons eux-mêmes et indépendantes de leur direction. Nous étudierons la première partie sous le titre général de *lumière non polarisée*, et la deuxième sous le titre de *lumière polarisée*.

PREMIÈRE PARTIE.

LUMIÈRE NON POLARISÉE.

CHAPITRE PREMIER.

De la Catoptrique ou de la réflexion de la lumière.

72. Réflexion sur une surface plane. — Lorsqu'on fait tomber dans la chambre noire un faisceau de lumière solaire *ll'* (Pl. 32, Fig. 12) sur un miroir poli de métal *mm'*, on observe en général deux phénomènes remarquables : 1° on distingue dans une direction déterminée un faisceau *rr'* qui semble partir du miroir et qui trace sur les corps qu'il rencontre une image brillante du soleil; tous les rayons de ces faisceaux sont des rayons *régulièrement* réfléchis, ils ont d'autant plus d'éclat que le miroir est mieux poli; 2° des divers points de la chambre noire on distingue la portion du miroir sur laquelle tombe la lumière; les rayons *id*, *id'*, *id''*, etc., qui sont ainsi dispersés dans tous les sens, sont des rayons *irrégulièrement* réfléchis; ils ont d'autant plus d'éclat que le miroir est moins poli.

L'angle *lip* qu'un rayon incident *li* fait avec la normale *ip* au point d'incidence *i*, se nomme *angle d'incidence*.

L'angle *rip* qu'un rayon réfléchi *ri* fait avec la normale *p* au point d'incidence, se nomme *angle de réflexion*.

Le plan formé par l'angle d'incidence se nomme *plan d'incidence*.

Le plan formé par l'angle de réflexion se nomme *plan de réflexion*.

Ces définitions s'appliquent à tous les rayons incidents et réfléchis; mais nous ne devons nous occuper en ce moment que de la *réflexion régulière*, et voici les lois suivant lesquelles elle s'accomplit :

1° *Le plan de réflexion coïncide avec le plan d'incidence.*

2° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence et situé de l'autre côté de la normale.*

Ces deux vérités fondamentales peuvent être démontrées par une seule expérience, que les astronomes ont occasion de répéter souvent et avec des instruments d'une grande précision.

Autour du centre *c* d'un grand cercle vertical *vv'* (Fig. 13), se meut une lunette *l* avec laquelle on observe les étoiles. D'abord, on fait une observation par la lumière directe *ed*, ensuite on en fait une autre par la lumière *e'ir* qui est réfléchie sur la surface tranquille d'un vase plein de mercure, et l'on trouve constamment que l'angle *dcp* est égal à l'angle *pco'*. Or, les verticales *pc* et *ip'* étant parallèles ainsi que les rayons *ed* et *e'i* qui viennent d'une même étoile, il est évident que les angles *dcp* et *pco'* sont respectivement égaux aux angles *e'ip'* et *p'ir*, et que par conséquent ceux-ci sont égaux entre eux, et il est évident en outre que le plan d'incidence *e'ip'* coïncide avec le plan de réflexion *p'ir*.

Il n'est pas nécessaire de prouver directement que le rayon *ir* provient de *e'i*, puisqu'au point *i* il ne peut tomber qu'un rayon parallèle à *ed*.

Ces deux lois de la réflexion sont tout à fait générales et ne souffrent aucune exception; elles sont vraies pour la lumière naturelle qui nous vient des astres, et pour la lumière artificielle que nous pouvons produire par la combustion, par les actions chimiques, la phosphorescence, l'électricité, etc.

Au moyen de ces principes, il est facile de démontrer que les miroirs plans doivent nous faire voir des *images* des objets, et que ces images sont toujours *symétriques* des objets par rapport au plan du miroir.

En effet, soit *mm'* un miroir plan (Fig. 14), et *l* un point lumineux; du point *l* abaissons sur la surface du miroir ou sur son prolongement une perpendiculaire *lk* que nous prolongerons d'une quantité égale à elle-même; le point *l'* qui la termine est *symétrique* du point *l*. Mais, si nous menons une ligne *l'ir* en un point quelconque du miroir et une ligne *li* au même point, les angles *lik* et *l'ik* étant égaux, les angles *lip* et *l'ip'* le seront aussi; donc *rip*, opposé par le sommet à *l'ip'*, sera égal à *lip*; ainsi le rayon qui tombe suivant *li* doit se réfléchir suivant le prolongement de *l'i*. Ce qui est vrai pour ce rayon est vrai pour tous les autres; donc enfin tous les *rayons du faisceau réfléchi*

Digitized by Google

$rir'i'$ *sont dirigés comme s'ils partaient du point* l', *qui est le point symétrique du point* l.

Supposons maintenant que l'on place l'œil quelque part en o dans le faisceau réfléchi, et que rr' représente l'ouverture de la pupille. Le petit pinceau de lumière qui tombe dans la pupille est exactement dirigé comme s'il venait du point l'; ainsi par ce pinceau l'œil voit le point lumineux en l' sans soupçonner que la lumière vient du point l et qu'elle a été brisée par la réflexion en ii'.

Ce raisonnement s'appliquant à chacun des points d'un corps lumineux quelconque, il en résulte que la flamme d'une bougie, par exemple, qui est située en bg (Fig. 15), doit être vue en $b'g'$, car le sommet s est vu en s', le point b en b', le point g en g', etc. Les corps qui ne sont pas lumineux, mais simplement éclairés, présentent les mêmes phénomènes, parce que la lumière qui est irrégulièrement réfléchie sur chacun des points de leur surface, se propage comme si elle était immédiatement produite par ces points.

Les images ne sont donc pas *renversées*, comme on le dit quelquefois, mais elles sont *symétriques* des objets; ce qui est très-différent.

Pour construire, en général, une image symétrique d'un corps par rapport à un plan, il faut de tous les points de ce corps abaisser des perpendiculaires sur le plan, et prolonger chacune d'une quantité égale à elle-même; l'ensemble des extrémités de ces perpendiculaires prolongées forme l'image symétrique.

S'il existait des surfaces réfléchissantes parfaitement polies, l'œil ne pourrait ni les distinguer, ni même en soupçonner l'existence; car les corps ne sont perceptibles à distance que par les rayons irrégulièrement réfléchis à leur surface; et tous les rayons régulièrement réfléchis font voir les points lumineux d'où ils sont sortis, et non pas les réflecteurs sur lesquels ils tombent. Si le globe de la lune, par exemple, était poli comme la surface d'un globule de mercure, nous ne pourrions pas le voir en le regardant, mais nous verrions seulement l'image du soleil qui l'éclaire.

Dans le même milieu parfaitement homogène, la lumière peut se mouvoir indéfiniment sans éprouver la moindre réflexion régulière; mais toutes les fois qu'elle se présente pour

passer d'un milieu dans un autre, elle éprouve à la surface de séparation de ces milieux une réflexion régulière plus ou moins abondante.

Si la direction de la lumière réfléchie est déterminée avec une précision géométrique, il n'en est pas de même de son intensité. Sur ce point difficile, dont nous nous occuperons à la fin de l'optique, on sait seulement :

1° Que la quantité de lumière régulièrement réfléchie va croissant avec l'angle d'incidence, sans toutefois être nulle quand cet angle est nul ;

2° Qu'elle dépend du milieu *dans* lequel la lumière se meut et du milieu *sur* lequel elle tombe ;

3° Qu'elle est très-différente pour des corps de différente nature qui sont placés dans les mêmes circonstances.

Nous citerons quelques exemples à l'appui de ces résultats généraux pour les faire mieux comprendre.

En regardant la flamme d'une bougie par réflexion sur un morceau de verre dépoli, on ne distingue pas son image quand l'angle d'incidence est très-petit, mais on la distingue assez nettement quand cet angle est très-grand. On peut même alors la distinguer sur un morceau de bois, ou d'étoffe, ou même sur un morceau de papier noirci au noir de fumée. Ces expériences prouvent en même temps que tous les corps réfléchissent régulièrement une certaine proportion de la lumière qu'ils reçoivent, et que cette proportion va croissant avec l'obliquité des rayons.

73. Goniomètre de Charles. — Les lois de la réflexion de la lumière ont été appliquées à la mesure des angles dièdres des corps polis, et particulièrement des cristaux. Les appareils dont on se sert pour cet objet se nomment des *goniomètres ;* nous nous bornerons à décrire ici le goniomètre de Charles.

Cet appareil est représenté dans la figure 16 : il se compose d'un cercle de cuivre *a*, porté par un pied à trois vis calantes qui servent à le mettre horizontalement ; sur ce cercle se monte une alidade *b* formant vers le centre une capsule *c*, sur laquelle on dispose avec de la cire molle le prisme ou le cristal dont on veut mesurer les angles ; la seule condition à remplir est que l'arête qui forme le sommet de l'angle dièdre dont on cherche la mesure, soit bien exactement verticale, et par conséquent parallèle à l'axe de rotation de l'alidade sans avoir une trop

Digitized by Google

grande excentricité. Pour cela, on se sert de la lunette fixe *d*, au foyer de laquelle se trouvent disposés des fils parallèles et verticaux; avec cette lunette on regarde une ligne verticale éloignée, comme un paratonnerre ou l'arête d'un édifice, puis, après avoir constaté la coïncidence de cette ligne avec l'un des fils micrométriques de la lunette, on regarde cette même ligne par réflexion sur l'une des faces de l'angle dièdre, et ensuite sur l'autre face du même angle; si ces deux images réfléchies, que l'on obtient successivement en faisant tourner l'alidade, viennent l'une et l'autre tomber sous le même fil micrométrique, il est évident que les deux faces de l'angle dièdre sont l'une et l'autre verticales au moment où elles réfléchissent l'image de la ligne qui sert de mire : par conséquent elles sont toujours verticales pendant le mouvement de rotation, et l'arête de l'angle dièdre est elle-même verticale. Il suffit de quelques tâtonnements pour arriver à cette coïncidence. Lorsqu'elle est bien constatée, on met l'alidade au zéro de la division du cercle *a*, et l'on fait tourner ensemble le cercle et l'alidade jusqu'à ce que l'image réfléchie de la mire tombe sous le fil micrométrique central; alors on fixe le cercle par sa vis de pression, et l'on fait tourner l'alidade seule jusqu'à ce que l'image réfléchie sur l'autre face vienne tomber sous le même fil, et l'angle dont il a fallu faire marcher l'alidade est le *supplément* de l'angle cherché. On voit en effet sur la figure 17 que, si la première réflexion a eu lieu sur la face *sy*, la deuxième a lieu quand la face *sy* a pris la position *s'y'*, et par conséquent lorsqu'elle a décrit un angle supplément de l'angle cherché.

74. Réflexions sur deux plans parallèles. — Le point *p* (Fig. 18) se trouve entre deux miroirs parallèles *m* et *m'*, et l'œil, placé en *o*, aperçoit derrière le miroir *m* un grand nombre d'images dont on peut facilement se rendre compte. Les rayons qui tombent directement sur *m* forment une image en *a*; ceux qui tombent directement sur *m'* forment une image en *a'*. Ces derniers rayons, après leur réflexion, sont donc comme s'ils partaient du point *a'*, et, en venant tomber sur le miroir *m*, ils forment une image qui se trouve en *b* (le point *b* étant symétrique de *a'* par rapport à *m*); derrière *m'*, il y a pareillement une image en *c* (le point *c* étant symétrique de *a* par rapport à *m'*). Les rayons qui ont éprouvé une première réflexion sur *m*, et une deuxième réflexion sur *m'*, reviennent donc de nouveau en *m*;

Digitized by Google

ils sont comme s'ils partaient du point *c*, et donnent par conséquent une image en *d* (le point *d* étant symétrique de *c* par rapport à *m*), etc.

On comprend comment les réflexions successives font apercevoir un nombre infini d'images de plus en plus sombres; il serait très-facile d'exprimer algébriquement la loi de leurs distances mutuelles.

Si l'on voulait distinguer parmi les images celles qui résultent d'une première réflexion sur *m* et celles qui résultent d'une première réflexion sur *m'*, on pourrait placer entre les miroirs un corps qui serait rouge, par exemple, du côté de *m*, et bleu du côté de *m'*; alors, d'un côté, toutes les images seraient alternativement rouges et bleues, et de l'autre, alternativement bleues et rouges.

75. **Réflexion sur deux miroirs inclinés.** — Les phénomènes précédents se reproduisent entre deux miroirs inclinés, avec cette différence que le nombre des images visibles est alors dépendant de l'angle des miroirs. Il suffira d'examiner les cas où les miroirs font entre eux un angle droit : *mc* (Fig. 19) représente la coupe du premier, et *m'c* celle du second ; du point *c* de leur intersection commune on a décrit une circonférence de cercle *amm'*. Un objet placé en *a* fait une image en *b* par la réflexion sur *mc*, et une image en *b'* par la réflexion sur *m'c* : de plus, les rayons qui ont subi une première réflexion sur *mc* et qui retombent sur *m'c* donnent une image en *d* (le point *d* étant symétrique de *b'* par rapport à *m'c*), et ceux qui ont subi une première réflexion sur *m'c* et qui retombent sur *mc* donnent une image au même point *d* (puisque ce point est aussi le symétrique de *b* par rapport à *mc*). Il en résulte que si l'on place l'œil à l'un des bouts des miroirs et près de leur intersection commune, pour recevoir en même temps les rayons directs et ceux qui ont éprouvé une ou deux réflexions, on verra quatre images du point *a*, savoir l'image directe en *a*, puis les images réfléchies en *b*, *b'* et *d*.

C'est sur ce principe que repose la construction du *kaléidoscope*.

Les positions relatives des images qui peuvent être obtenues aisément par une construction graphique ne peuvent pas être liées par une formule aussi simple que dans le cas des miroirs parallèles; par l'effet de l'inclinaison, les images, en s'enfonçant circulairement derrière les miroirs, finissent par tomber dans

l'angle opposé par le sommet à celui que les miroirs font entre eux; alors elles deviennent *improductives*, comme l'a remarqué M. Bertin (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXIX, p. 257, année 1850); c'est-à-dire qu'elles doivent être assimilées à des points lumineux qui ne peuvent plus envoyer de lumière sur les miroirs. En tenant compte de ces circonstances, M. Bertin arrive aux conclusions suivantes : quand l'angle des miroirs est contenu n fois dans la circonférence (n étant un nombre entier), il y a en général $n+1$ images, y compris l'objet, et seulement n si n est pair ou si l'objet est à égale distance des miroirs; quand l'angle des miroirs est contenu dans la circonférence un nombre de fois $n+$ une fraction, il y a toujours $n+1$ images et même $n+2$ pour les objets convenablement placés.

76. Réflexion sur les miroirs courbes. — On adopte en optique ce principe fondamental, que la réflexion se fait en un point quelconque d'une surface courbe, comme elle se ferait sur le plan tangent en ce point. Nous verrons tout à l'heure que ce principe est en effet confirmé par de nombreuses expériences, mais l'on pourrait aussi le démontrer directement par la théorie. Il en résulte que les lois générales précédentes s'appliquent sans restriction à toutes les surfaces, et que tout se réduit à trouver pour chaque point la direction du plan tangent ou de la normale, ce qui est simplement un problème de géométrie.

Ainsi, un point lumineux placé au centre d'une sphère creuse et polie à l'intérieur enverrait des rayons sur tous les points de la surface, et chacun de ces rayons serait réfléchi sur lui-même, et reviendrait directement au centre après la réflexion. De même, un point lumineux placé à l'un des foyers d'un ellipsoïde enverrait des rayons sur tous les points de la surface, et tous ces rayons iraient par les réflexions se réunir et se concentrer en l'autre foyer; puis, en continuant leur route, ils retourneraient au premier foyer après une seconde réflexion, reviendraient au second foyer après une troisième, et ainsi de suite.

Un point lumineux placé au foyer d'un paraboloïde enverrait des rayons qui seraient tous réfléchis parallèlement à l'axe et s'en iraient se perdre à l'infini; réciproquement, un point placé à l'infini comme une étoile, et sur l'axe d'un paraboloïde, enverrait des rayons qui viendraient tous se concentrer au foyer.

77. Réflexion sur les miroirs sphériques. — Si l'on imagine une sphère dont l'intérieur soit très-poli, et qu'on la coupe par

Digitized by Google

un plan, on en détache une *calotte* qui est un *miroir sphérique concave* : ce serait un *miroir sphérique convexe* si la sphère était polie en dehors.

L'*ouverture* du miroir est l'angle des deux rayons *cm* et *cm'* menés du centre *c* de la sphère aux bords opposés de la calotte (Fig. 20); son *diamètre* est la ligne *mm'*; son *axe* est la ligne *ac* menée du centre de la calotte au centre de la sphère.

Le point *a* s'appelle aussi le *centre de figure* du miroir, et le point *c* son *centre de courbure*.

Lorsqu'un point lumineux *s* est situé sur l'axe du miroir (Fig. 21), tous les rayons qu'il envoie à une petite distance angulaire du point *a* viennent, après leur réflexion, se réunir en un même point *f*. Pour le démontrer, soient *si* l'un de ces rayons, *ci* la normale au point d'incidence, et *if* le rayon réfléchi; désignons par x, y, z les angles *asi*, *aci*, *afi*; par d l'angle d'incidence *cis* et l'angle de réflexion *cif* qui lui est égal, et par b, r, m les trois distances *as*, *ac*, *af*. Puisqu'on suppose que x, y, z ne dépassent pas 3 ou 4°, ces angles peuvent être pris pour leurs tangentes, en même temps l'arc *ai* peut être pris pour une ligne droite perpendiculaire à *as*, et les triangles rectangles *asi*, *aci*, *afi* donnent

$$x=\frac{ai}{b};\quad y=\frac{ai}{r};\quad z=\frac{ai}{m}.$$

On a d'une autre part

$$x=y-d \quad \text{et} \quad z=y+d,$$

d'où $$z+x=2y, \quad \text{ou} \quad z=2y-x,$$

qui devient par les valeurs précédentes

$$\frac{ai}{m}=\frac{2ai}{r}-\frac{ai}{b},$$

ou

$$\frac{1}{m}=\frac{2}{r}-\frac{1}{b}.$$

Cette valeur de $\frac{1}{m}$ étant indépendante des angles x, y et z, on doit en conclure que tous les rayons émis par le point *s* viennent en effet se réunir et se concentrer au même point *f*, qui s'appelle pour cette raison le *foyer* du point *s*; mais cette conséquence est vraie seulement sous la condition que les angles x, y, z puissent être pris pour leurs tangentes, ce qui limite

Digitized by Google

essentiellement l'ouverture du miroir, et la réduit à ne pas dépasser 8 ou 10°. Pour une ouverture plus grande, le concours de tous les rayons ne serait plus exact, et il y aurait ce qu'on appelle *aberration de sphéricité*.

Si le point lumineux était situé hors de l'axe du miroir, on pourrait toujours par ce point et par le centre c du miroir mener une ligne droite qui s'appelle alors *axe secondaire;* et comme les mêmes raisonnements s'appliqueraient encore à l'égard de cet axe secondaire, on en conclut enfin que la formule précédente est une formule générale qui convient à tous les cas. Nous devons ajouter cependant que si l'axe secondaire faisait avec l'axe principal ac un angle de 15 ou 20°, les angles x, y, z ne pourraient plus être assez petits, et c'est là ce qui limite le *champ du miroir*, c'est-à-dire l'étendue conique dans laquelle doit être compris un point lumineux, pour que tous les rayons réfléchis concourent au même foyer avec une exactitude suffisante.

En se concentrant au même point, tous les rayons réfléchis forment une *image* nette et brillante du point lumineux d'où ils sont émanés, et le lieu de cette image est toujours facile à trouver, puisqu'elle est, d'une part, sur la ligne menée par le point lumineux et le centre du miroir, et puisque, d'une autre part, elle est à une distance du miroir donnée par la valeur de m, que l'on obtient aisément quand on connaît r et b, c'est-à-dire le rayon du miroir et la distance du point lumineux.

Pour mieux faire comprendre la formule générale, nous allons discuter quelques-uns des résultats qu'elle donne.

1° Quand b a une valeur infinie, tous les rayons sont parallèles; on a $m = \frac{r}{2}$; c'est-à-dire que le foyer est alors à la moitié du rayon (Fig. 22). Ce foyer se nomme *foyer principal*, et sa distance au miroir, *distance focale principale* ou *longueur focale*.

La figure 23 représente la marche des rayons pour un faisceau parallèle, et oblique à l'axe du miroir.

2° Pour $b = 100r$, on a $m = \frac{100r}{199}$; ainsi, il suffit que la distance de l'objet au miroir soit égale à 100 fois le rayon pour que l'image se fasse sensiblement au foyer principal.

3° Pour $b = 2r$, on a $m = \frac{2r}{3}$; ainsi, pendant que l'objet se

rapproche du miroir depuis l'infini jusqu'à une distance double du rayon, l'image n'éprouve qu'un petit déplacement et s'éloigne seulement depuis $\frac{r}{2}$ jusqu'à $\frac{2r}{3}$.

4° Pour $b = r$, on a $m = r$, ce qui doit être, puisque tous les rayons envoyés du centre doivent revenir au centre.

5° Pour $b = \frac{r}{2}$, on a $m = \infty$, c'est-à-dire qu'en mettant le point lumineux au foyer, tous les rayons réfléchis forment alors un faisceau parallèle et ne vont se rencontrer qu'à l'infini (Fig. 22, 23), ce qui doit être, puisque l'infini et le foyer principal sont deux foyers conjugués.

6° Quand b est plus petit que $\frac{r}{2}$, c'est-à-dire quand le point lumineux est plus près du miroir que le foyer principal, m prend alors une valeur négative : cela ne veut pas dire que les rayons réfléchis ne se rencontrent plus, mais seulement qu'ils se rencontreraient si on les prolongeait derrière le miroir (Fig. 24). Le foyer v se nomme alors *foyer virtuel*, parce que les rayons n'y passent pas en réalité, bien qu'ils soient dirigés comme s'ils y passaient.

Il résulte de cette discussion que, si un objet ss' (Fig. 21) était disposé sur une surface sphérique ayant le même centre c que le miroir, il formerait en mm' une image *renversée* qui en serait l'exacte représentation; on aura une idée du rapport de grandeur qui existe entre l'image et l'objet, si l'on remarque que du centre du miroir ils seraient l'un et l'autre vus sous le même angle.

Si tous les points d'un objet n'étaient pas à la même distance du centre, tous les points de son image n'en seraient pas non plus à la même distance.

Tous ces résultats se trouvent vérifiés par les expériences suivantes :

Un large faisceau de lumière solaire tombant sur le miroir mm' (Fig. 22, 23), on voit une petite image resplendissante du soleil en f ou en f', suivant que le faisceau incident est parallèle ou oblique à l'axe. Le soleil étant vu de la terre sous un angle d'environ 30′, son image regardée du centre c serait vue sous le même angle. Ainsi sa grandeur absolue dépend du rayon du miroir : par exemple, au foyer du grand réflecteur d'Herschel,

qui a 80 pieds de rayon, l'image du soleil a environ 3 pouces de diamètre, et elle n'a guère que 3 lignes au foyer d'un miroir de 6 pieds de rayon, et 3 millimètres au foyer d'un miroir de 1 mètre de rayon; grande ou petite, cette image a un très-vif éclat; dans l'espace circonscrit qu'elle occupe, se trouvent concentrées à la fois toute la lumière et toute la chaleur du faisceau incident.

On peut se servir de cette expérience pour déterminer le rayon de courbure d'un miroir donné; mais alors il faut en couvrir la surface avec un morceau d'étoffe ou de papier dans lequel on laisse seulement deux ouvertures près des bords en v et v' (Fig. 25), car il est bien plus facile de déterminer exactement le point de rencontre des petits faisceaux vf et $v'f$, que le lieu où l'image complète du soleil a le plus petit diamètre et la plus grande netteté.

On reconnaît aisément que des objets éloignés d'environ 100 fois le rayon du miroir font leur image à très-peu près au même point que le soleil.

En promenant la flamme d'une bougie dans une chambre noire, à diverses distances devant le miroir, sur l'axe ou hors de l'axe, il est facile de vérifier tous les autres résultats du calcul que nous avons indiqués; son image se reçoit sur un petit écran de papier ou sur un morceau de verre dépoli; si l'écran était trop large, il arrêterait une trop grande partie des rayons incidents qui arrivent au miroir.

Les *miroirs convexes* ne donnent que des *foyers virtuels* ou des *images virtuelles*. Il est facile de voir que pour ces miroirs la formule principale devient :

$$-\frac{1}{m}=\frac{2}{r}+\frac{1}{b}.$$

Les valeurs de b et de r étant essentiellement positives, les valeurs de m seront toujours négatives, et, comme elles sont comptées à partir du point a, c'est une preuve que le foyer tombe toujours derrière le miroir de a vers c (Fig. 26, 27); ainsi, le foyer n'est jamais produit par la *rencontre réelle* des rayons, mais par leur *rencontre virtuelle* ou par la rencontre de leurs prolongements.

Pour $b=\infty$, on a $m=\frac{r}{2}$; c'est la plus grande valeur négative de m (Fig. 26).

Pour $b = r$, on a $m = -\frac{r}{3}$;

Enfin pour $b = 0$, on a $m = 0$.

On peut aussi vérifier ces résultats par l'expérience en couvrant un miroir convexe avec un carton percé de deux trous, et en suivant la direction des petits pinceaux réfléchis pour déterminer le point où leurs prolongements vont se couper derrière le miroir (Fig. 27).

78. **Miroirs coniques et cylindriques.** — Nous ne citerons ces miroirs que pour donner une idée de la marche des rayons qui sont réfléchis à leur surface et des illusions plus ou moins singulières qui en peuvent résulter.

bsb' (Fig. 28) est la coupe d'un miroir conique dont la surface latérale extérieure est très-polie. On le pose par sa base en bnb', au milieu d'un carton circulaire sur lequel on dessine, suivant certaines lois, des figures bizarres que l'on appelle *anamorphoses*. L'œil placé en o, un peu au-dessus du sommet du cône (Fig. 28), aperçoit par réflexion une figure régulière résultant des traits déformés qui sont tracés sur le carton.

Pour se rendre compte de cette espèce d'illusion, il suffit de remarquer que le point c, par exemple, fera par la réflexion son image en c', et que les points compris entre b et c feront leurs images sur la ligne bc'.

Les miroirs cylindriques présentent des effets analogues, dont on pourra facilement se rendre compte par les premières notions de géométrie et de perspective.

79. **Caustiques.** — Quand les rayons envoyés par un seul point lumineux, et réfléchis ensuite par une surface courbe continue quelconque, ne se réunissent pas tous en un même foyer, il arrive toujours que les rayons voisins se rencontrent, et alors les points consécutifs où ils se coupent engendrent une surface que l'on nomme *catacaustique* ou *caustique par réflexion*. Quand la réflexion se fait sur une ligne, et non pas sur une surface, la caustique est une simple ligne.

La recherche de la forme des caustiques est un problème qui a exercé la sagacité de plusieurs habiles géomètres.

80. **Héliostat de Gambey.** — L'héliostat est un instrument destiné à réfléchir les rayons solaires dans une direction qui reste invariable pendant un jour entier, malgré les hauteurs sans cesse changeantes du soleil au-dessus de l'horizon. Ce pro-

Digitized by Google

blème avait été résolu, mais M. Gambey en a donné une solution plus simple et plus ingénieuse ; son héliostat est représenté (Pl. 32, Fig. 29, 30) ; nous ne pouvons donner ici qu'une idée du principe sur lequel repose sa construction.

a est un cercle qui se dispose toujours parallèlement à l'équateur ; il se meut sur lui-même d'un mouvement uniforme, de manière à accomplir sa révolution complète en 24^h comme le soleil ; c'est l'horloge *h* qui le met en mouvement.

b est un arc de cercle dont le plan se dispose toujours dans le méridien du lieu au moyen de son alidade ; il est perpendiculaire au cercle équatorial, et fait corps avec l'axe autour duquel celui-ci fait sa révolution en 24^h, en sorte qu'il suffit de l'incliner plus ou moins suivant la latitude du lieu, pour que le cercle équatorial se trouve lui-même dans le plan de l'équateur. L'alidade *v*, qui porte deux pinnules, sert à régler une première fois pour toutes les points où doivent se placer les trois vis du pied de l'appareil pour que le plan du cercle *b* se trouve fidèlement dans le méridien.

c est l'arc des déclinaisons ; il se règle chaque jour d'après les tables de déclinaison du soleil, se déplaçant ainsi dans le cours de l'année de $23^\circ\ 28'$ de part et d'autre du zéro qui correspond à l'équinoxe. Ces déplacements s'opèrent de la manière suivante : sur le limbe du cercle équatorial, aux deux extrémités d'un même diamètre, s'élèvent perpendiculairement deux montants auxquels s'adapte, par deux pivots *yz*, le demi-cercle mobile *d*, qui peut ainsi à l'équinoxe se mettre parallèlement au cercle équatorial, s'incliner sur lui de $23^\circ\ 28'$, en s'élevant pour le solstice d'été et en s'abaissant pour le solstice d'hiver. Le demi-cercle *d* entraîné avec l'équatorial par le mouvement de l'horloge porte deux pièces importantes, savoir : l'arc *c* des déclinaisons et la douille *g* dans laquelle glisse la tige *t* du miroir *m*. L'arc *c* a son centre au point où l'axe *yz* coupe l'axe de l'équatorial, c'est ainsi qu'il mesure la déclinaison du soleil ; il passe d'ailleurs dans une pince où une vis de pression l'arrête à la hauteur voulue par la déclinaison du jour.

m est un miroir métallique destiné à recevoir et à réfléchir les rayons solaires ; ce miroir est dirigé : 1° au moyen d'une queue *f* à fourchette et à douille mobile sur une pièce conique dont l'axe se met dans une direction quelconque qui reste fixe ; le prolongement de cet axe va aboutir au milieu *s* de l'axe *yz* ;

2° au moyen de la tige *t*, dont l'axe est dans le plan du miroir ; cette tige va passer dans la douille *g*, qui l'emporte dans son mouvement de rotation. Il résulte de cette disposition que, dans le cours d'une journée, la tige *t* du miroir ou plutôt le plan du miroir lui-même décrit un cône oblique autour de la queue du miroir ; le sommet de ce cône est le centre même du miroir où passe le prolongement de l'axe de la queue *f*, et sa base est le cercle décrit par l'anneau *g* qui reste parallèle à l'équateur, et par conséquent au cercle décrit par le soleil. Bien que *g* décrive un cercle plus ou moins incliné, sa distance au point *s* reste constante et décrit un cône plus ou moins ouvert, suivant que la déclinaison du soleil est plus ou moins grande, et ce cône s'ouvre dans un sens ou dans l'autre, suivant que la déclinaison est australe ou boréale ; mais cette distance invariable *sg* est toujours égale à la distance invariable qui existe entre le point *s* et le centre *i* du miroir : c'est ce que l'on voit plus distinctement sur la figure 30, où *g* est la position de l'anneau correspondante à l'équinoxe, et g' et g'' ses positions correspondantes aux solstices.

Le triangle *isg* ou *isg'* est donc toujours isocèle, et perpendiculaire au plan du miroir *mm'*. Si l'on représente maintenant par *li* le rayon solaire incident, pour l'équinoxe, il est évident qu'il sera toujours réfléchi suivant la direction *if'* du prolongement de la queue *si*, car il est réfléchi dans le plan d'incidence, qui est le plan du triangle isocèle *isg*, lorsque l'héliostat est bien à l'heure, et en même temps il fait avec le plan du miroir un angle *lig* égal à *sig*, ou *sgi* ou *mif*. Le même raisonnement s'appliquerait au rayon *l'i* du solstice, puisque l'anneau serait alors en g', de sorte que *g's* serait parallèle à *l'i*. On peut donner à la queue *f* telle direction que l'on voudra, et être assuré que le rayon réfléchi prendra cette direction pendant la journée entière.

M. Silbermann a imaginé d'après ces principes un héliostat autrement disposé ; la description du mécanisme et de l'agencement de ses différentes pièces exigerait ici de trop longs détails.

Digitized by Google

CHAPITRE II.

Dioptrique ou Réfraction de la lumière.

81. Lois générales de la réfraction. — La réfraction est la déviation ou le changement de direction qu'éprouve la lumière en passant d'un milieu dans un autre. Au passage du verre dans le vide, ou de l'air dans l'eau, ou, en général, d'un milieu dans un autre, un rayon de lumière n'éprouve pas, sans doute, une déviation brusque et instantanée, comme une ligne géométrique qui se brise; il est probable qu'il se courbe et s'incline par degrés avant d'arriver à sa nouvelle direction rectiligne; mais si cette courbure se forme réellement, son étendue est si petite qu'il n'est jamais possible d'en constater l'existence. Nous représenterons donc les rayons réfractés comme de simples lignes brisées.

L'*angle d'incidence lin* (Pl. 33, Fig. 1) est ici, comme pour la réflexion, l'angle du rayon incident avec la normale au point d'incidence.

L'*angle de réfraction rin'* est l'angle du rayon réfracté *ir* avec le prolongement *in'* de la normale.

Le *plan d'incidence* et le *plan de réfraction* sont respectivement les plans des angles d'incidence et de réfraction. Un rayon incident ne donne naissance, en général, qu'à un seul rayon réfracté : cependant il existe des corps, tels que le spath d'Islande, le cristal de roche et plusieurs autres cristaux, dans lesquels un seul rayon incident donne presque toujours naissance à deux rayons réfractés; ces phénomènes de *double réfraction* sont liés à la *polarisation* de la lumière que nous étudierons plus tard; pour le moment, nous ne devons nous occuper que des lois de la *réfraction simple*. Ces lois sont exprimées dans les deux propositions suivantes :

1° *Le plan de réfraction coïncide toujours avec le plan d'incidence;*

2° *Le rapport des sinus d'incidence et de réfraction est constant pour les mêmes milieux.*

La première de ces propositions ne présente aucune difficulté,

mais nous allons prendre un exemple pour faire mieux comprendre la seconde.

Supposons que, dans un vase hémisphérique de verre (Fig. 2), on verse de l'eau jusqu'à ce que le niveau nn' atteigne le centre c : un petit pinceau de lumière solaire dirigé vers le centre fera un angle d'incidence lcp que l'on mesurera sur le cercle divisé npn', et un angle de réfraction rcp' que l'on mesurera de même sur le contour du vase, car il sera facile de reconnaître le point par lequel il vient sortir pour repasser dans l'air. Le sinus du premier de ces angles est la perpendiculaire ld, le sinus du second est la perpendiculaire rf : le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction est ld divisé par rf, et l'on trouvera ce rapport sensiblement égal à $\frac{4}{3}$; ainsi

$$\frac{ld}{rf} = \frac{4}{3}.$$

Un autre pinceau tombant dans la direction $l'c$ donnerait un autre pinceau réfracté $r'c$; les sinus d'incidence et de réfraction seraient alors $l'd'$ et $r'f'$, et l'on aurait encore :

$$\frac{l'd'}{r'f'} = \frac{4}{3}.$$

Il en serait de même pour tous les pinceaux, quelle que soit leur incidence. Par conséquent, il est vrai de dire que le rapport des sinus d'incidence et de réfraction est constant pour les mêmes milieux. Ce résultat s'exprime en général de la manière suivante :

$$\frac{\sin a}{\sin b} = n.$$

a est l'angle d'incidence ou celui du premier milieu;
b, l'angle de réfraction ou celui du second milieu;
n, *l'indice* de réfraction.

Dans l'exemple précédent on aurait $n = \frac{4}{3}$; mais, si la surface de l'eau était en contact avec de l'hydrogène, ou avec de l'air raréfié ou avec le vide, ou enfin avec un milieu différent de l'air ordinaire, *l'indice*, toujours constant pour toutes les incidences, aurait dans chaque cas une valeur plus ou moins différente de la valeur précédente. Si l'eau changeait de température, elle deviendrait réellement un autre milieu, et cette circonstance seule apporterait dans la valeur de l'indice un changement plus ou moins sensible.

Digitized by Google

L'appareil précédent est précisément celui qui fut employé autrefois par Descartes pour vérifier par l'expérience les lois de la réfraction : car la découverte de ces lois est due au génie de ce grand géomètre ; il y avait été conduit *a priori* par des considérations théoriques que l'on regarde aujourd'hui comme de simples jeux d'imagination, et qui ont cependant l'avantage d'avoir produit l'une des lois les plus belles et les plus fécondes de l'optique.

Nous indiquerons plus loin des moyens d'observation plus précis et plus propres à démontrer l'exactitude mathématique de ces lois.

Quand la lumière repasse de l'eau dans l'air, l'angle d'incidence est alors celui qu'elle fait dans l'eau, et l'angle de réfraction celui qu'elle fait dans l'air ; mais, tout en changeant de nom, ces angles ne changent pas de valeur ; le rayon qui tombe suivant *rc* se réfracte suivant *cl*, comme on peut le démontrer par l'expérience : c'est ce que l'on exprime d'une manière générale en disant qu'*un rayon qui rebrousse chemin repasse exactement par les mêmes lieux*. Ainsi, n étant l'indice de réfraction quand la lumière passe d'un premier milieu dans le second, $\frac{1}{n}$ est l'indice de réfraction quand elle repasse du second dans le premier.

Si la valeur de n est plus grande que l'unité, $\sin a$ est plus grand que $\sin b$, et a plus grand que b ; ce qui prouve que la lumière, en se réfractant, *se rapproche de la normale :* on dit alors que le second milieu est *plus réfringent* que le premier (Fig. 3).

Si n est égal à l'unité, $\sin a$ est égal à $\sin b$, et a égal à b ; c'est une preuve que la lumière ne se réfracte pas : on dit alors que le second milieu est *aussi réfringent* que le premier (Fig. 4).

Si n est plus petit que l'unité, $\sin a$ est plus petit que $\sin b$, et a plus petit que b ; c'est une preuve que la lumière en se réfractant *s'éloigne de la normale :* on dit alors que le second milieu est *moins réfringent* que le premier (Fig. 5).

Ces résultats s'énoncent ordinairement en disant la lumière *se rapproche* ou *s'éloigne* de la normale, suivant que le second milieu est *plus dense* ou *moins dense* que le premier. Cette expression n'est pas rigoureusement exacte, parce qu'il arrive quelquefois qu'un milieu *moins dense* qu'un autre est cependant *plus*

Digitized by Google

réfringent ; et, en général, la *réfrangibilité* est loin d'être proportionnelle à la *densité*.

La plus petite valeur de l'angle d'incidence est zéro; alors le rayon tombe suivant la normale; et comme le sinus d'un angle nul est lui-même égal à zéro, il est nécessaire que l'on ait aussi $\sin b = 0$, ou $b = 0$, ou, en d'autres termes, il est nécessaire que le rayon pénètre en ligne droite sans se dévier. C'est en effet ce que l'expérience confirme : jamais il n'y a de réfraction quand la lumière tombe suivant la normale à la surface de séparation des deux milieux (Fig. 6).

La plus grande valeur de l'angle d'incidence est 90°; alors le rayon tombe parallèlement à la surface de séparation, c'est l'*incidence rasante* (Fig. 7); comme le sinus de 90° est égal à l'unité, on a :

$$\frac{1}{\sin b} = n, \quad \text{ou} \quad \sin b = \frac{1}{n}.$$

La valeur de b que l'on en déduit est l'*angle limite*. Pour l'air et l'eau on a $n = \frac{4}{3}$; et par conséquent $b = 48°35'$; jamais la lumière ne peut pénétrer de l'air dans l'eau sous une plus grande obliquité.

Ainsi, dans un vase plein d'eau, toute la lumière qui arrive des différents côtés de l'horizon en un point donné est essentiellement comprise dans un cône dont ce point est le sommet et dont l'angle au centre est de deux fois 48° 35'.

Réciproquement, quand la lumière, pour sortir de l'eau dans l'air, se présente sous un angle plus grand que l'angle limite, il est impossible qu'elle sorte, et il se produit alors un phénomène remarquable que l'on appelle le *phénomène de la réflexion totale :* les rayons qui ne peuvent sortir par l'excès de leur obliquité se réfléchissent en *totalité* suivant les lois ordinaires de la réflexion (Fig. 8), et c'est le seul cas où la lumière puisse se réfléchir sans diminuer d'intensité.

Pour le verre ordinaire, l'indice de la réfraction peut varier depuis $\frac{3}{2}$ à 1,545, et par conséquent l'angle limite est compris entre 41° 49' et 40° 20'. Il en résulte que si l'on avait un cylindre de verre terminé à l'une de ses extrémités par un plan perpendiculaire à l'axe, et à l'autre par un plan incliné d'environ 40° et demi, on pourrait le tourner directement vers le soleil,

Digitized by Google

et placer impunément l'œil contre la face oblique, car on ne recevrait ainsi aucun rayon de lumière solaire. Le faisceau de lumière qui arrive à cette face fait alors avec la normale un angle d'environ 40° et demi, et éprouve par conséquent la réflexion totale.

DES PRISMES.

82. Définitions et phénomènes généraux que présentent les rayons qui traversent des prismes. — Un *prisme*, en optique, est un milieu diaphane terminé par deux surfaces planes, polies et inclinées entre elles.

Le *sommet* du prisme est la ligne suivant laquelle se rencontrent les deux faces, ou suivant laquelle elles se rencontreraient si elles étaient suffisamment prolongées.

La *base* du prisme est un plan quelconque opposé au sommet, soit qu'il existe en réalité, soit que l'on suppose seulement son existence.

L'angle *réfringent* est l'angle formé par les deux faces du prisme.

Une *section principale* est une section faite par un plan perpendiculairement à l'arête qui forme le sommet.

Dans la plupart des expériences nous emploierons des prismes à trois faces rectangulaires ab', ac' et bc' (Fig. 10). Alors, quand la lumière traverse les faces ab' et bc', c'est l'arête bb' qui est le sommet, et la face ac' qui est la base; quand elle traverse ac' et bc', c'est cc' qui est le sommet, et ab' qui est la base.

La section principale abc ou $a'b'c'$ d'un tel prisme est toujours un triangle, et suivant que ce triangle est rectangle, isocèle, équilatéral ou scalène, on dit que le prisme est lui-même *rectangle*, *isocèle*, *équilatéral* ou *scalène*.

Ces prismes sont en général montés sur un pied de cuivre (Fig. 9). En tirant le tube *t* on peut les élever plus ou moins, et au moyen du *genou g* on peut leur donner toutes les positions qu'exigent les expériences.

Voici maintenant les phénomènes les plus généraux que présentent les prismes, soit avec la lumière ordinaire, soit avec la lumière solaire.

Premièrement. Un prisme étant horizontal, le sommet en haut, si l'on approche l'œil près de l'une des faces pour recevoir la lumière qui est entrée par l'autre, on observe deux phé-

Digitized by Google

nomènes remarquables : les objets sont considérablement *déviés* et comme relevés vers le sommet du prisme ; de plus, ils sont colorés vers leurs bords de toutes les couleurs de l'iris, du moins vers leurs bords horizontaux, car les bords verticaux ne prennent point de couleurs nouvelles. Si le sommet du prisme était en bas, les phénomènes seraient inverses. En plaçant le prisme *verticalement*, les phénomènes se produisent alors *horizontalement* de droite à gauche ou de gauche à droite, suivant la position du sommet du prisme. En variant ainsi les observations, on peut constater que la déviation a lieu vers le sommet du prisme perpendiculairement aux arêtes, et la coloration toujours parallèlement aux arêtes, c'est-à-dire que les objets ne sont colorés des nuances de l'iris que dans leurs bords qui se trouvent parallèles au prisme.

Secondement. Lorsqu'un trait de lumière solaire pénètre dans la chambre noire par une petite ouverture suivant la direction *vd* (Fig. 11), si l'on interpose près du volet un prisme horizontal dont le sommet soit en haut, on observe de même une déviation et une coloration. Le trait est rabaissé vers la base du prisme dans la direction *pr*, et l'image du soleil, qui était en *d* circulaire et blanche, paraît en *r* allongée perpendiculairement aux arêtes du prisme et colorée des plus vives nuances de l'iris. Elle forme ce qu'on appelle le *spectre solaire.* Quand le sommet du prisme est en bas, la déviation se fait en haut avec les mêmes apparences ; si le prisme est vertical ou incliné, elle se fait alors latéralement ou obliquement, et il est facile de vérifier par l'expérience qu'elle se fait toujours perpendiculairement aux arêtes du prisme.

Dans le chapitre suivant nous ferons l'analyse du spectre solaire, et, en général, de la coloration des faisceaux qui traversent les prismes ; pour le moment, nous allons nous occuper de leur déviation.

83. Direction des rayons dans les prismes, et conditions de leur émergence. — Les angles d'incidence et de réfraction étant toujours dans le même plan, il est clair que tous les rayons qui tombent dans une section principale accomplissent leur trajet sans sortir de cette section. Par conséquent, pour suivre la marche de ces rayons, il nous suffira de considérer l'angle ou le triangle qui forme la section du prisme.

Soient *as* (Fig. 12) la première face d'un prisme de verre,

Digitized by Google

et $a's$ la seconde; li un rayon incident faisant avec la normale un angle lin; ii' et $i'e$ le rayon réfracté et le rayon émergent qui en résultent. En passant de l'air dans le verre, le rayon li se brise et se rapproche de la normale; arrivé à la seconde face sous une certaine obliquité, il se brise de nouveau et repasse dans l'air en s'écartant de la normale; on conçoit que sa direction d'émergence $i'e$ dépend de l'indice de réfraction de l'air par rapport au verre, de l'angle réfringent du prisme, et de l'angle d'incidence sur la première face. Ces quatre quantités sont en effet liées entre elles par une formule remarquable; mais, pour ne pas entrer dans une discussion mathématique trop compliquée, nous nous contenterons d'examiner les cas particuliers les plus importants.

Cherchons d'abord les conditions sous lesquelles l'émergence peut avoir lieu; car nous savons que la lumière qui est dans un milieu plus réfringent que l'air ne peut pas toujours en sortir pour repasser dans l'air, et qu'il y a pour son incidence un angle limite au delà duquel se produit une réflexion totale.

Soit ν cet angle limite, qui est pour le verre ordinaire d'environ 40° 30′, et g l'angle réfringent du prisme, nous examinerons seulement les cas où l'on a :

$$g = 2\nu, \quad g = \nu \quad \text{et } g < \nu.$$

1° Si l'angle réfringent du prisme est double de l'angle limite, aucun des rayons qui sont entrés par la première face ne peut sortir par la seconde. En effet, le rayon qui est entré parallèlement à ai (Fig. 13) se réfracte suivant ii', en faisant avec la normale un angle $i'in' = \nu$. Donc ii est perpendiculaire à la ligne sm qui divise l'angle réfringent du prisme en deux parties égales, car, d'après l'hypothèse, $msi = \nu$. Ainsi, en arrivant à la seconde face, le rayon ii' se présente sous l'angle limite, et ne peut sortir, ou du moins il est le dernier de ceux qui peuvent sortir. Tout autre rayon incident tel que li donnerait un rayon réfracté ii'' qui serait plus oblique en arrivant à la seconde face, et éprouverait nécessairement la réflexion totale.

2° Si l'angle réfringent est égal à l'angle limite, tous les rayons qui tombent entre la normale et la base du prisme peuvent sortir par la seconde face.

En effet, le rayon qui entre suivant la normale ni (Fig. 14) passe en droite ligne et arrive à la seconde face en faisant un

angle $ii'n' = v$, car cet angle est complément de $ii's$, qui est lui-même complément de l'angle réfringent $i'si$ que nous avons supposé $= v$; donc ce rayon est le dernier de ceux qui peuvent sortir. Tous les rayons compris entre *ai* et *ni* tomberont sous une moindre obliquité et pourront émerger : au contraire, tous ceux qui tomberont dans l'angle *sin* entreront sous une obliquité plus grande, et éprouveront à la seconde face une réflexion totale.

3° Quand l'angle réfringent est plus petit que l'angle limite, plusieurs des rayons qui tombent sur la première surface, entre la normale et le sommet, peuvent émerger à la seconde surface. Cela résulte évidemment de ce que nous venons de voir tout à l'heure; mais il est visible en même temps que jamais les rayons qui tombent suivant *si* ne peuvent émerger, puisqu'ils font avec la seconde surface un angle plus grand qu'avec la première dans l'intérieur du prisme, et celui-ci est déjà l'angle limite.

Pour faciliter l'application de ces principes, nous donnons dans le tableau suivant les indices de réfraction et les angles limites de plusieurs substances.

Noms des substances.	Indices de réfract.	Angles limites.	Noms des substances.	Indices de réfract.	Angles limites.
Chromate de plomb..	2,926 ..	19° 59′	Rubis............	1,779 ..	34° 12′
Diamant..........	2,470 ..	23 53	Topaze...........	1,610 ..	38 24
Soufre...........	2,040 ..	29 21	Flint............	1,600 ..	38 41
Zircon...........	2,015 ..	29 45	Crown............	1,533 ...	40 43
Grenat...........	1,815 ..	33 27	Quartz...........	1,548 ..	40 15
Spinelle.........	1,812 ..	33 30	Alun.............	1,457 ..	43 21
Saphir...........	1,768 ..	34 26	Eau (liquide)......	1,336 ..	48 28

84. Déviation produite par les prismes, déviation minimum. — Quand la condition d'émergence est remplie, les rayons sortent en effet par la seconde face et sont plus ou moins déviés de leur direction primitive. L'*angle de déviation* ou la *déviation* est l'angle que l'image directe fait avec l'image réfractée, quand l'objet est supposé infiniment loin : ainsi *li* étant le rayon incident, et $i'c$ le rayon émergent (Fig. 15), si l'on suppose l'œil en *c* assez loin du prisme, il pourra recevoir en même temps un pinceau dans la direction oci' et un pinceau dans la direction $o'cl'$, parallèle à *li*; le premier fera voir l'objet par réfraction, le second le fera voir directement, et l'angle $i'cl' = d$ de ces deux images est la déviation; cet angle est évidemment égal à oco'.

Il est facile de démontrer par le calcul que cette déviation

change avec l'angle d'incidence, qu'elle a cependant un minimum, et que sa valeur minimum a lieu quand les angles d'incidence et d'émergence sont égaux entre eux (FIG. 15), ou, ce qui revient au même, quand le rayon réfracté ii' fait un triangle isocèle isi' avec les côtés du prisme, ou enfin quand l'angle de réfraction est $\frac{g}{2}$, g étant l'angle réfringent; en effet, le triangle sii' étant isocèle, $\frac{g}{2}$ est complément de sii' qui est lui-même complément de l'angle de réfraction correspondant. Cette position est remarquable et d'une grande utilité dans beaucoup d'expériences; il en résulte qu'en désignant par d l'angle de déviation minimum, par a l'angle d'incidence, et par g l'angle réfringent du prisme, on a :

$$d = 2a - g.$$

En effet, si l'on mène par le point c les lignes cb et cb', respectivement parallèles à sa et sa', on a :

$$d = 180 - l'cb - g - b'co;$$

et, comme $b'co = l'cb = lia = 90 - a$,

$$d = -180 - 180 + 2a - g,$$

ou

$$d = 2a - g,$$

et par conséquent

$$a = \frac{d+g}{2}.$$

Si l'on représente par n l'indice de réfraction de la substance, on a en général :

$$\frac{\sin a}{\sin b} = n;$$

et, puisque dans la position dont il s'agit on a

$$a = \frac{d+g}{2} \quad \text{et} \quad b = \frac{g}{2},$$

il en résulte

$$\frac{\sin\left(\frac{d+g}{2}\right)}{\sin\frac{g}{2}} = n,$$

formule importante qui permet de trouver le rapport de réfraction n par la seule observation de la déviation minimum d, car il est toujours facile de déterminer l'angle réfringent g.

Digitized by Google

Voici la disposition générale des expériences :

85. Indices de réfraction des solides et des liquides transparents. — 1° Pour les *corps solides*, on en fait d'abord un prisme dont on mesure l'angle réfringent g avec le goniomètre. Ce prisme est ensuite disposé verticalement sur une petite plate-forme liée à la lunette supérieure d'un cercle répétiteur (Fig. 15); cette plate-forme est mobile sur son plan autour d'un axe vertical. La lunette inférieure du même cercle est dirigée sur un point d'une mire éloignée et se fixe dans cette position; ensuite, avec la lunette supérieure, on cherche à recevoir l'image réfractée du même point de la mire, ce qui sera toujours facile si le prisme est bien vertical. Dès que cette image vient tomber sous le fil de la lunette, on fait tourner en même temps le prisme au moyen de la plate-forme, et la lunette pour suivre l'image. Après quelques essais, on trouve la position de la déviation minimum dont la mesure est donnée par l'angle des lunettes. Cette valeur et la valeur connue de $\frac{g}{2}$ étant substituées dans la formule précédente, il n'y a plus d'inconnue que la valeur de n que l'on détermine aisément.

2° Pour les *liquides*, on suit exactement le même procédé, mais on leur donne la forme de prisme de la manière suivante : on perce un trou de part en part dans un prisme de verre (Fig. 16), et un trou plus petit v dans sa base. Le premier se ferme en appliquant sur chaque face de prisme une petite plaque de verre à faces bien parallèles, ensuite on le remplit de liquide et l'on met en v un bouchon à l'émeri. On a coutume de faire sur la longueur d'un prisme solide cinq ou six prismes liquides.

Le tableau suivant contient les résultats des expériences pour les solides et les liquides les plus usuels.

Digitized by Google

Tableau des Indices de réfraction.

NOMS DES SUBSTANCES.	INDICES de réfraction.	NOMS DES SUBSTANCES.	INDICES de réfraction.
Chrom. de plomb, maximum	2,974	Flint-glass	1,576
— minimum	2,500	— *autre espèce*	1,596
Diamant	2,755	Quartz, *réfr. extraordinaire*	1,558
Soufre fondu	2,148	— *réfr. ordinaire*	1,548
— natif	2,115	Glace de Saint-Gobain	1,543
Carbon. de plomb, maximum	2,084	Crown-glass	1,534
— minimum	1,813	—	1,533
Rubis	1,779	—	1,525
Feldspath	1,764	Sulfate de chaux	1,525
Chrysobéril	1,760	Nitre, maximum	1,514
Nitrate de plomb	1,758	— minimum	1,335
Carb. de strontiane, maximum	1,700	Sulfate de potasse	1,509
— minimum	1,543	—	1,495
Boracite	1,701	Sulfate d'ammon. et de magn.	1,483
Verre coloré en orangé	1,695	Carbonate de potasse	1,482
Sulfure de carbone	1,678	Spermacéti fondu	1,446
Aragonite, *réfr. ordinaire*	1,6931	Spath fluor	1,436
— *réfr. extraordinaire*	1,5348	Alcool	1,374
Spath calcaire, *réfr. ordinaire*	1,6543	Albumine	1,360
— *réfr. extraord.*	1,4833	Éther	1,358
Sulfate de baryte	1,6468	Humeur aqueuse de l'œil	1,337
— *réfr. ordinaire*	1,6201	— vitrée	1,339
— *réfr. extraord.*	1,6352	Enveloppe extérieure du cristallin	1,377
Topaze incolore	1,6102	Enveloppe moyenne	1,379
— du Brésil, *réfr. extraord.*	1,6401	— centrale	1,399
— — *réfr. ordinaire*	1,6325	Cristallin entier	1,384
Anhydrite, *réfr. extraordinaire*	1,6219	Eau	1,336
— *réfr. ordinaire*	1,5772	Glace	1,310
Euclase, *extraordinaire*	1,663	Air	1,000294
— *ordinaire*	1,6429	Vide	1,000000
Flint-glass	1,60512		

86. Du changement de valeur de l'indice de réfraction d'une substance quand le milieu qui l'environne change de nature, et de la vitesse de la lumière dans les différents milieux. — Dans le tableau précédent, les indices de réfraction sont déterminés en supposant que la lumière passe immédiatement du vide dans chacune des substances; mais si la lumière passait, par exemple, de l'eau dans le verre, il est évident que l'indice de réfraction du verre par rapport à l'eau ne pourrait pas être le même que l'indice de réfraction du verre par rapport au vide, bien qu'il soit constant dans un cas comme dans l'autre. Soient n et n' les indices de *réfraction de deux substances par rapport au vide, l'indice de la seconde, par rapport à la première, est* $\frac{n'}{n}$.

Digitized by Google

On peut démontrer cette vérité fondamentale par des expériences semblables à celles qui servent à déterminer, en général, les indices de réfraction ; pour cela, il suffit d'accoler deux prismes de diverses substances, soit en opposant leurs angles, soit en les tournant dans le même sens (Fig. 18), et d'observer la déviation que ce système imprime à la lumière. Les angles d'incidence et d'émergence étant connus ainsi que les angles réfringents des prismes et leurs indices de réfraction par rapport au vide, il sera facile de trouver par le calcul les angles *imn*, et *i'mn'* du rayon avec la surface commune, et de vérifier si leurs sinus sont entre eux comme les indices n et n'. On peut aussi employer deux lames parallèles superposées (Fig. 19) ; alors on reconnaît par l'expérience que le rayon incident *li*, et le rayon émergent *i'e*, sont toujours parallèles. Or, n et n' étant les indices de réfraction de la première et de la seconde substance par rapport au vide, on a :

$$\frac{\sin a}{\sin b}=n \quad \text{et} \quad \frac{\sin a'}{\sin b'}=\frac{1}{n'}.$$

a est l'angle *lin*,
b l'angle $min' = imp$,
a' l'angle $mi'q = i'mp'$.
b' l'angle $ei'q'$.

Et puisque $a = b'$, on en déduit :

$$\frac{\sin a'}{\sin b}=\frac{n}{n'} \quad \text{ou} \quad \frac{\sin i'mp'}{\sin imp}=\frac{n}{n'}.$$

Donc, en passant du premier milieu dans le second, la lumière fait des angles tels, que le rapport de leurs sinus est constant et égal au rapport des indices de ces milieux relativement au vide.

Il en résulte évidemment qu'un rayon de lumière qui traverse un nombre quelconque de milieux à faces parallèles se trouve réfracté par le dernier de ces milieux, comme il l'aurait été s'il y fût entré immédiatement sous la même incidence. Ainsi, dans la figure 19, si un rayon tombait immédiatement sur le second milieu, en m, parallèlement à *li*, il se réfracterait suivant *mi'*, et émergerait comme il fait suivant *i'e*.

Nous démontrerons plus tard que la vitesse de propagation de la lumière est différente dans les différents milieux, et que le

Digitized by Google

rapport de ses vitesses dans leurs milieux quelconques est précisément le rapport inverse des indices de réfraction de ces milieux ; par conséquent, la plus grande vitesse a lieu dans le vide, et la moindre dans le chromate de plomb, qui est le milieu le plus réfringent. En rapprochant ce résultat du précédent, on voit que, dans le même milieu, la lumière a toujours la même vitesse, quelle que soit la route qu'elle suive pour y arriver, et les réfractions qu'elle éprouve dans son trajet.

87. Indices de réfraction des corps opaques. — Le phénomène de la réflexion totale dont nous avons parlé a conduit Wollaston à un procédé ingénieux pour déterminer l'indice de réfraction de certains corps opaques, et par suite leur puissance réfractive et leur pouvoir réfringent.

Concevons un prisme rectangulaire diaphane *abd* (Fig. 17), dont l'une des faces *ad* soit horizontale, et imaginons qu'une goutte de liquide soit immédiatement appliquée contre cette face en *i*; *n* est l'indice de réfraction du prisme et *n'* celui du liquide; *vv'* est une règle verticale sur laquelle on fait glisser un *voyant* ou une plaque percée d'un petit trou pour regarder dans la direction *oe* et dans d'autres directions plus ou moins obliques. Si le prisme est de crown-glass, dont l'indice soit de 1,535, l'angle limite sera 40° 39′ et par conséquent le rayon qui aurait pénétré parallèlement à *ad* viendrait tomber sur *bd*, en faisant un angle de 90° — 40° 39′ = 49° 21′, et ne pourrait sortir. Ainsi, en regardant par la face *bd*, on ne verra aucun des objets qui sont au delà de la face *ad*; seulement, par réflexion totale sur cette face, on pourra distinguer les objets qui sont au-devant de *ab*. C'est en effet ce que l'expérience confirme, sur tous les points de *ad* qui ne sont pas recouverts de liquide; mais là où le liquide touche le verre il se produit un autre phénomène. La lumière qui vient dans diverses directions, telles que *l'i*, passe dans la goutte sans éprouver de réflexion totale, et l'œil, placé dans la direction *o'e'*, aperçoit en *i* une tache noire comme si le *miroir ad* était percé d'un trou. Cependant, à mesure que l'œil s'abaisse vers *o*, pour regarder par des rayons plus obliques, la goutte paraît moins noire, et enfin, *si le liquide est moins réfringent que le prisme*, il arrive qu'à une certaine obliquité, telle que *oe*, par exemple, la goutte disparaît subitement, et la face *ad* fait partout l'effet d'un miroir parfait. C'est en mesurant cette obliquité de disparition, ou l'angle *eov*, que l'on peut dé-

terminer l'indice n' du liquide qui mouille le prisme en i ; en effet, cet angle étant connu, on en déduit son complément $oep = a$. En substituant sa valeur et celle de n dans la relation

$$\frac{\sin a}{\sin b} = n;$$

on en déduit l'angle $b = p'ei$, et par suite son complément $eiq = qil$. Or, puisque c'est sous cette obliquité que la goutte commence à disparaître, il est clair que le rayon li est le rayon limite, c'est-à-dire, celui qui, en passant dans le liquide, donne un rayon émergent parallèle à ad ; on a donc :

$$\frac{\sin 90^\circ}{\sin liq} = \frac{n}{n'}; \quad \text{d'où} \quad n' = n \sin liq.$$

On peut donner une autre forme à cette valeur inconnue de n' en l'exprimant directement au moyen de l'angle observé eov, que nous désignerons par v. On aurait alors :

$$n'^2 = n^2 - \cos^2 v.$$

Cette formule est celle qui convient aux corps diaphanes que l'on met en contact avec le prisme : mais, quand ces corps sont opaques, l'on se sert de cette autre formule :

$$n'^2 = n^2 - 2\cos^2 v.$$

Les raisonnements que nous avons faits pour démontrer la première ne s'appliquent nullement à la seconde, et s'il est nécessaire de l'adopter pour les corps opaques, comme la théorie de l'émission l'indique, il est nécessaire aussi de trouver dans la théorie des ondulations des raisonnements qui la justifient, car ceux que je pourrais donner ici me semblent insuffisants.

88. **Puissance réfractive et pouvoir réfringent.** — On est convenu d'appeler *puissance réfractive* d'une substance le carré de son indice de réfraction diminué de l'unité, ou $n^2 - 1$. Cette définition n'est pas purement arbitraire comme elle le paraît d'abord : la quantité $n^2 - 1$ a reçu un nom particulier, parce qu'elle a une liaison simple et remarquable avec la cause de la réfraction dans le système de l'émission ; elle est l'accroissement du carré de la vitesse que prend la lumière en passant du vide dans les diverses substances ; car, dans ce système, on est inévitablement conduit à supposer que la lumière augmente de vi-

tesse en passant dans les milieux plus réfringents. Dans le système des ondulations, cette même quantité dépend des divers degrés de densité de l'éther.

La puissance réfractive peut être évaluée d'une manière absolue ou d'une manière relative : par exemple, 1,326 et 0,785 sont les puissances réfractives absolues du verre et de l'eau, ou les valeurs de $n^2 - 1$ correspondant à ces substances; mais, en divisant le premier de ces nombres par le second, l'on aurait 1,690, qui serait la puissance réfractive du verre par rapport à celle de l'eau.

Le *pouvoir réfringent* d'une substance est le quotient de sa puissance réfractive par sa densité. Ainsi le pouvoir réfringent du verre ordinaire est 0,533, et celui de l'eau 0,785; et, si l'on voulait évaluer le premier par rapport au second, c'est-à-dire, en prenant le second pour unité, il faudrait diviser 0,533 par 0,785, ce qui donnerait 0,679 pour le pouvoir réfringent du verre rapporté à l'eau.

Quand une substance se dilate ou se condense, soit par une action mécanique, soit par la chaleur, son indice de réfraction change ainsi que sa densité; mais il paraît que son pouvoir réfringent reste sensiblement constant, sous la seule condition que cette substance ne passe pas à l'état gazeux, car nous verrons bientôt que dans ce cas le pouvoir réfringent éprouve une diminution sensible.

89. Indices de réfraction des gaz, puissance réfractive, pouvoir réfringent. — Pour déterminer l'indice de réfraction de l'air, on pourrait faire passer la lumière du vide dans un prisme d'air d'un angle connu; mais l'expérience inverse offre plus de facilités : on fait passer le rayon au travers d'un prisme vide environné d'air ; et l'indice de réfraction se détermine encore comme dans les solides et les liquides, c'est-à-dire, par la connaissance de l'angle réfringent du prisme, de l'incidence de la lumière sur sa première face, de l'émergence à la seconde et de la déviation, en ajoutant à ces données la température et la pression de l'air environnant. L'indice de réfraction de l'air une fois trouvé, on arrive par des expériences analogues à l'indice des différents gaz pour des températures et des pressions connues. Cette question délicate et importante a été traitée par MM. Arago et Biot en 1805, et par Dulong en 1825. Nous essayerons seulement de donner ici une analyse des procédés qui

Digitized by Google

ont été employés par ces habiles physiciens, et des résultats auxquels ils sont parvenus.

MM. Arago et Biot employaient un *prisme à gaz* qui est représenté vu par en haut dans la figure 21. Il se compose d'un tube de verre tt' de 20 à 30 centimètres de longueur sur 4 à 5 centimètres de diamètre, dont les deux extrémités sont d'abord coupées en sifflet suivant les directions tf et $t'f'$, et ensuite recouvertes et fermées hermétiquement par des lames de verre à faces parallèles. L'angle que ces lames forment entre elles est l'angle du prisme; il doit être très-grand à cause de la faible réfringence du gaz : dans l'appareil de MM. Arago et Biot, il était de 143° 7′ 28″. Au milieu de la longueur du tube, et parallèlement aux faces du prisme, on pratique deux ouvertures opposées pour introduire ou enlever à volonté, au moyen d'une machine pneumatique, le gaz que l'on veut soumettre à l'expérience. Les petits tubes qui sont scellés dans ces ouvertures sont munis de robinets convenables, et communiquent à un baromètre qui donne à chaque instant la pression du gaz intérieur.

Supposons que le prisme soit vide, que son arête soit verticale, et qu'il ait été disposé pour l'expérience en un lieu d'où l'on puisse apercevoir une mire très-éloignée (Fig. 21) : l'observateur, placé en o, verra une image directe ol de cette mire, et une image réfractée oe; l'angle loe sera la déviation; cet angle devra être observé avec une grande exactitude, car il s'élèvera seulement à 5 ou 6′; avec cette donnée et l'angle réfringent du prisme, on pourra trouver l'indice de réfraction par la formule précédente si l'on a choisi la position du minimum : seulement il faudra faire les corrections nécessaires, soit à cause de l'air qui reste dans le prisme, soit à cause du défaut de parallélisme des lames qui en forment les faces.

Par des expériences précises et souvent répétées, MM. Biot et Arago ont établi qu'à la température de 0°, et sous la pression de 0m,76; l'indice de réfraction de l'air, par rapport au vide absolu, est de 1,000294, et sa puissance réfractive est par conséquent 0,000588. Ce résultat se trouve parfaitement conforme à celui que Delambre avait déduit des réfractions astronomiques.

L'indice de réfraction de l'air une fois connu, on fait passer dans le prisme les gaz que l'on veut soumettre à l'expérience, et, après avoir observé la déviation qu'ils produisent, il reste à

faire les calculs convenables pour en déduire soit les indices de réfraction, soit les puissances réfractives. MM. Arago et Biot ont soumis à l'expérience l'air, l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, l'ammoniaque, l'acide carbonique et l'acide hydrochlorique; et ils ont établi ce principe fondamental, que *les puissances réfractives d'un gaz sont proportionnelles à sa densité*, ou, ce qui revient au même, que *le pouvoir réfringent d'un gaz est constant à toute température et à toute pression*. Ce principe est encore vrai, quand les gaz se *mélangent* d'une manière quelconque, c'est-à-dire que la puissance réfractive d'un mélange est égale à la somme des puissances réfractives de ses éléments. Mais nous allons voir, d'après les recherches de Dulong, que toutes les fois que les gaz se *combinent*, la puissance réfractive du produit cesse d'être égale à la somme des puissances réfractives des composants.

Dulong s'est principalement proposé de comparer entre elles les puissances réfractives des gaz à la même température et sous la même pression, et l'artifice ingénieux qu'il a employé pour y parvenir lui a permis de donner à ses résultats un degré d'exactitude véritablement inespéré dans des recherches aussi délicates. Cet artifice consiste à donner aux différents gaz une densité telle qu'ils impriment tous exactement la même déviation à la lumière; pour cela, un prisme analogue au précédent, ayant un angle de 145° environ, communique à un réservoir *r* (Fig. 20), dans lequel on peut d'une part faire le vide au moyen de la machine pneumatique, et de l'autre introduire un gaz quelconque en variant à volonté les pressions. L'on fait, par exemple, une première expérience en introduisant dans le prisme de l'air sec sous la pression ordinaire et à une température connue; avec une bonne lunette placée à quelque distance, on regarde l'image d'une mire éloignée réfractée au travers du prisme; cela fait, on fixe la lunette dans cette position, on vide le prisme bien complétement, sans le déranger, et l'on y introduit un autre gaz, de l'acide carbonique, par exemple, en variant la pression jusqu'à l'instant où l'image réfractée de la mire vient tomber de nouveau sous le fil de la lunette. La température étant restée la même, supposons que la pression de l'acide carbonique dans le prisme soit alors de 0,498 : sous cette pression, l'acide carbonique déviant la lumière autant que l'air à 0,76, il est évident qu'il a le même indice de réfraction et la

même puissance réfractive, et, puisque les puissances réfractives sont proportionnelles aux densités, on aura :

$$1 : x :: 0,498 : 0,76;$$

d'où $x = 1,526$, qui sera la puissance réfractive de l'acide carbonique sous la pression de 0,76 et à la même température que l'air.

Par des expériences analogues sur tous les gaz simples ou composés, on obtiendra, comme on le voit, leurs puissances réfractives relativement à l'air au moyen d'une simple proportion.

Les résultats de Dulong sont contenus dans le tableau suivant :

Tableau des puissances réfractives des gaz et de leurs indices de réfraction à 0° et 0m,76.

Noms des gaz.	Puiss. réfract. par rapport à l'air.	Puissances réfract. absolues.	Indices de réfraction.
Air atmosphérique..........	1,000	0,000589	1,000294
Oxygène..................	0,924	0,000544	1,000272
Hydrogène................	0,470	0,000277	0,000138
Azote....................	1,020	0,000601	1,000300
Ammoniaque...............	1,309	0,000771	1,000385
Acide carbonique..........	1,526	0,000899	1,000449
Chlore...................	2,623	0,001545	1,000772
Acide hydrochlorique........	1,527	0,000899	1,000449
Oxyde d'azote.............	1,710	0,001007	1,000503
Gaz nitreux...............	1,030	0,000606	1,000303
Oxyde de carbone..........	1,157	0,000681	1,000340
Cyanogène................	2,832	0,001668	1,000834
Gaz oléfiant..............	2,302	0,001356	1,000678
Gaz des marais............	1,504	0,000886	1,000443
Éther muriatique	3,720	0,002191	1,001095
Acide hydrocyanique........	1,531	0,000903	1,000451
Gaz oxychlorocarbonique.....	3,936	0,002318	1,001159
Acide sulfureux............	2,260	0,001331	1,000665
Hydrogène sulfuré..........	2,187	0,001288	1,000644
Éther sulfurique...........	5,197	0,003061	1,00153
Soufre carburé............	5,110	0,003010	1,00150
Hydrogène protophosphoré...	2,682	0,001579	1,000789

Les nombres de la première colonne sont le résultat direct de l'expérience; en les multipliant par 0,000589, qui exprime la puissance réfractive de l'air, on obtient les nombres de la

Digitized by Google

deuxième colonne, ou n^2-1 ; ensuite, pour obtenir les indices de réfraction, il suffit d'ajouter l'unité et d'extraire la racine carrée.

En comparant ces nombres, on en peut tirer les conséquences suivantes :

1° On ne découvre aucun rapport entre les nombres qui représentent les puissances réfractives des gaz et ceux qui représentent leurs densités ; car ces nombres croissent tantôt dans un même ordre, tantôt dans un ordre inverse.

2° La puissance réfractive d'un mélange est égale à la somme des puissances réfractives de ses éléments. Par exemple, l'air étant composé de 0,21 d'oxygène et 0,79 d'azote, on trouve que la somme des puissances réfractives des éléments est 0,99984, qui diffère très-peu de l'unité. M. Dulong a fait aussi des expériences directes sur plusieurs mélanges artificiels, pour vérifier ce résultat qui servait de principe à ses recherches.

3° La puissance réfractive d'un composé gazeux est tantôt plus petite, tantôt plus grande que la somme des puissances réfractives des composants. C'est en effet ce qui résulte du tableau suivant, dans lequel la première colonne représente les puissances réfractives observées, et la seconde les puissances réfractives calculées d'après les éléments consécutifs, en tenant compte des condensations qu'ils éprouvent.

Puissances réfractives des fluides élastiques composés.

La puissance réfractive de l'air = 1.

Noms des gaz.	Puiss. réfr. observées.	Puiss. réfr. calculées.	Excès de l'observ. sur le calcul.
Ammoniaque	1,309	1,216	+ 0,093
Oxyde d'azote	1,710	1,482	+ 0,228
Gaz nitreux	1,030	0,972	+ 0,058
Eau	1,000	0,933	+ 0,067
Gaz chloroxycarbonique	3,936	3,784	+ 0,015
Éther muriatique	3,720	3,829	— 0,099
Acide hydrocyanique	1,521	1,651	— 0,130
Acide carbonique	1,526	1,629	— 0,093
Acide hydrochlorique	1,527	1,547	— 0,02

Les différences sont trop sensibles pour qu'on puisse les attribuer à des erreurs d'observation, et il est impossible de supposer qu'elles tiennent à un défaut de pureté dans les gaz, parce

Digitized by Google

que l'on connaît l'habileté de Dulong et la scrupuleuse exactitude qu'il apportait dans ses préparations.

4° Le pouvoir réfringent d'une substance à l'état liquide est plus grand que le pouvoir réfringent de la même substance à l'état gazeux. Ce principe, qui avait été autrefois établi sur des expériences directes par MM. Arago et Petit (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. I^er^, p. 1), se trouve de nouveau confirmé par les résultats de Dulong. En effet, le pouvoir réfringent du carbure de soufre par rapport à l'air, est égal à sa puissance réfractive par rapport à l'air, 5,179, divisée par sa densité 2,644, ce qui donne 1,932 ; le carbure de soufre liquide a une densité 1,263, et son indice de réfraction est 1,678 ; sa puissance réfractive absolue est donc 1,816, et son pouvoir réfringent absolu 1,438. Mais l'air ayant une puissance réfractive absolue de 0,000588, et une densité par rapport à l'eau de 0,001299, son pouvoir réfringent absolu est 0,453. Par conséquent le pouvoir réfringent du carbure de soufre liquide par rapport à l'air est 1,438 divisé par 0,453, ou 3,176. Ainsi le carbure de soufre a un pouvoir réfringent plus grand que 3 à l'état liquide, et plus petit que 2 à l'état gazeux.

LENTILLES.

90. **Propriétés générales des lentilles.**—Les lentilles sont des corps diaphanes, qui ont la propriété d'augmenter ou de diminuer la convergence des faisceaux de lumière qui les traversent.

Nous ne devons étudier ici que les *lentilles sphériques*, c'est-à-dire celles dont les surfaces sont des plans ou des sphères, parce qu'elles sont à peu près les seules qui entrent dans la composition des divers instruments d'optique; au reste, les lentilles *elliptiques*, *paraboliques*, *cylindriques*, etc., présentent des résultats analogues.

En combinant de toutes les manières possibles les surfaces planes et sphériques, on ne peut former que six lentilles différentes.

La première (Fig. 22) est la lentille *bi-convexe*, formée de deux surfaces sphériques, convexes, dont les rayons sont égaux ou inégaux.

La deuxième (Fig. 23) est la lentille *plan-convexe*.

La troisième (Fig. 24) est le *ménisque convergent;* elle est formée par deux surfaces sphériques, l'une concave et l'autre

convexe, le rayon de la première étant plus grand que le rayon de la seconde.

La quatrième (Fig. 25) est la lentille *bi-concave*.

La cinquième (Fig. 26) est la lentille *plan-concave*.

La sixième enfin (Fig. 27) est le *ménisque divergent;* elle est formée par deux surfaces sphériques, l'une concave et l'autre convexe, le rayon de la première étant plus petit que le rayon de la seconde.

Les trois premières sont à *bords tranchants* et *convergentes.*

Les trois dernières sont plus épaisses au bord qu'au milieu, c'est-à-dire à *bords larges* et *divergentes*.

L'*axe* d'une lentille est la ligne mathématique cc' qui joint les deux centres de courbure de ses deux surfaces; pour les lentilles plan-concaves et plan-convexes, l'axe cp est la perpendiculaire abaissée du centre de courbure sur le plan.

Pour démontrer que les lentilles ont des foyers, *réels* ou *virtuels*, nous prendrons d'abord une lentille d'une épaisseur indéfinie tournant sa convexité vers un point lumineux s, situé sur son axe. Soient sd (Fig. 28) un rayon incident, cd la normale au point d'incidence, et dt le rayon réfracté qui vient couper l'axe au point t; désignons par x, y, z, les angles qui ont leurs sommets aux points s, c, t, et qui s'appuient sur l'arc ad; par b, r, m, les distances de ces points au point a, c'est-à-dire as, ac, at; enfin, par p et q, les angles d'incidence et de réfraction sdp et cdt. Tous ces angles sont supposés assez petits pour qu'on puisse les prendre pour leurs sinus ou pour leurs tangentes, et, en représentant par n l'indice de réfraction de la substance de la lentille, il est facile de voir que l'on a d'abord :

$$\sin p = n \sin q \quad \text{ou } p = nq; \quad p = x + y; \quad y = z + q.$$

En éliminant p et q au moyen de ces trois relations, l'on obtient :

$$x + nz = y(n-1),$$

qui devient

$$\frac{ad}{b} + \frac{n.ad}{m} = \frac{ad}{r}(n-1) \quad \text{ou} \quad \frac{1}{b} + \frac{n}{m} = \frac{n-1}{r},$$

lorsqu'on substitue les tangentes au lieu des angles, puisque l'arc ad peut être considéré comme une ligne droite perpendiculaire à as.

Cette relation entre n, b, m, r étant indépendante des angles d'incidence et de réfraction, il en résulte que sous les conditions

Digitized by Google

que nous avons admises, tous les rayons émanés du point s, qui tombent sur la lentillle, vont ensuite après la réfraction se couper au même point t de l'axe à une distance m. Il y a donc là un *foyer* par réfraction, et ce foyer sera *réel* s'il est réellement le point de concours des rayons, et *virtuel* s'il est seulement le point de concours de leur prolongement.

Il paraît facile de discuter la formule précédente dans toute sa généralité, mais, pour en faire mieux apprécier les résultats, nous la discuterons en supposant que la lentille soit de verre : alors, n étant égal à $\frac{3}{2}$, cette formule devient :

$$\frac{1}{b}+\frac{3}{2m}=\frac{1}{2r}.$$

1° Pour $b=\infty$, on a $m=3r$; c'est-à-dire que si le point lumineux est à l'infini, ou si les rayons incidents sont parallèles à l'axe, le point de concours a lieu à une distance qui est triple du rayon de courbure de la lentille. De plus, la valeur de m étant positive, le foyer est réel.

2° Pour $b=2r$, on a $m=\infty$; c'est-à-dire que le point lumineux se rapprochant depuis l'infini jusqu'à $2r$, le foyer s'éloigne depuis $3r$ jusqu'à l'infini.

3° Pour $b<2r$, on a pour m une valeur *négative;* c'est-à-dire qu'alors le foyer est *virtuel*, la lentille n'est plus assez efficace pour rendre ces rayons convergents dans son intérieur; ils restent alors divergents, et c'est leur prolongement qui va concourir sur l'axe, mais en dehors de la lentille et au delà du point s, comme il est facile de le voir.

4° Si l'on donne à b des valeurs négatives, cela signifie que les rayons incidents sont déjà en état de convergence, et les valeurs que l'on en déduit pour m donnent le nouveau point de convergence, plus rapproché, que la réfraction leur donne dans l'intérieur de la lentille; on peut le vérifier par des applications numériques ou par des constructions graphiques.

Nous avons trouvé la formule précédente en supposant la lentille convexe du côté du point lumineux; mais il est facile de voir, par une construction directe, que, pour l'appliquer à une lentille concave, il suffit de changer le signe de r, en conservant la condition que les valeurs positives de m indiquent des foyers réels, et les valeurs négatives des foyers virtuels.

Ces principes posés, nous pouvons examiner maintenant ce

Digitized by Google

qui arrive aux lentilles ordinaires, à deux surfaces courbes, dont l'épaisseur est toujours assez petite pour être négligée.

Soit un point lumineux s (Fig. 29) situé sur l'axe d'une lentille bi-convexe; si cette lentille avait une épaisseur indéfinie, la distance b' du point de concours des rayons incidents serait donnée par la formule

$$\frac{1}{b}+\frac{n}{b'}=\frac{n-1}{r},$$

b, n et r étant les mêmes que tout à l'heure, mais, presque au sortir de la première surface, les rayons réfractés vont rencontrer la deuxième pour passer du verre dans l'air, et leur nouveau point de concours aura lieu à une distance m donnée par la formule

$$-\frac{1}{b}+\frac{n'}{m}=\frac{n'-1}{r'},$$

dans laquelle r' est le rayon de courbure de la deuxième surface, et n' l'indice de réfraction du verre par rapport à l'air, en sorte que $n'=\frac{1}{n}$; sur quoi il faut faire remaquer que le premier terme est ici affecté du signe *moins*, parce que b' a nécessairement des valeurs de signes contraires, lorsqu'on le considère par rapport à la première ou par rapport à la deuxième surface de la lentille.

En éliminant b' entre ces deux équations, et en mettant $\frac{1}{n}$ au lieu de n', on arrive à la relation suivante :

$$\frac{1}{b}+\frac{1}{m}=\frac{n-1}{r}-\frac{n-1}{r'},$$

qui donne m au moyen de b, r, r' et n : suivant que la valeur de m est positive ou négative, le foyer est réel ou virtuel.

Si l'on suppose $b=\infty$, et si l'on désigne par f la valeur correspondante de m, il en résulte

$$\frac{1}{f}=\frac{n-1}{r}-\frac{n-1}{r'}.$$

Cette valeur de f, ou la distance focale des rayons parallèles, est ce que l'on appelle la *distance focale principale* d'une lentille. On est alors conduit aux deux équations

$$f=\frac{rr'}{(n-1)(r'-r)},\qquad \frac{1}{m}=\frac{1}{f}-\frac{1}{b},$$

qui renferment toute la théorie des lentilles.

Digitized by Google

En discutant la première, il est facile de voir que la valeur de f est toujours positive pour les lentilles convergentes, et toujours négative pour les lentilles divergentes; d'où il suit que le *foyer principal* est *réel* pour les premières, et *virtuel* pour les dernières. En effet,

Lentille bi-convexe...	$r=+$,	$r'=-$,	$f=+$	
» plan-convexe.	$r=+$,	$r'=\infty$,	$f=+$	
Ménisque convergent..	$r=+$,	$r'=+$,	$f=+$	parce que $r'>r$
Lentille bi-concave...	$r=-$,	$r'=+$,	$f=-$	
» plan-concave.	$r=-$,	$r'=\infty$,	$f=-$	
Ménisque divergent...	$r=-$,	$r'=-$,	$f=-$	parce que $r'>r$

Quant aux valeurs absolues de f, il est facile de les calculer, lorsqu'on connaît r, r' et n. Réciproquement, f et n étant donnés, on peut déterminer le rapport des deux rayons de courbure.

En discutant la seconde des équations précédentes, on voit que

$$\begin{array}{lcl} b=\infty & \text{donne} & m=f, \\ b=2f & & m=2f, \\ b=f & & m=\infty, \\ b=\frac{f}{2} & & m=-f; \end{array}$$

résultats qu'il est facile d'interpréter d'après ce que nous avons dit précédemment à l'occasion des miroirs, et qu'il est facile aussi de vérifier par l'expérience, soit au moyen de la lumière solaire, soit au moyen de la lumière d'une bougie.

Nous ferons seulement deux remarques : 1° l'objet et son image se trouvent précisément à égale distance de la lentille quand l'objet est placé devant elle à une distance double de la distance focale principale; 2° pour $b<f$, m devient négatif, c'est-à-dire que le foyer devient virtuel, il est alors du même côté que l'objet, mais sa distance à la lentille est toujours plus grande que celle de l'objet; la lentille diminuant alors la divergence sans pouvoir produire la convergence.

Pour les lentilles divergentes il faut faire attention que f est nécessairement négatif, ainsi pour avoir b positif et exprimé au

Digitized by Google

moyen de f, il faut dans ces valeurs de b donner à f le signe moins, on voit alors que

$$b=\infty \quad \text{donne} \quad m=f,$$
$$b=-2f \qquad m=\frac{2f}{3},$$
$$b=-f \qquad m=\frac{f}{2},$$
$$b=-\frac{f}{2} \qquad m=\frac{f}{3}.$$

Il en résulte que devant une lentille divergente un objet placé à toutes les distances, depuis 0 jusqu'à l'infini, donne toujours des images virtuelles puisque m est toujours négatif comme f. De plus la lentille augmente toujours la divergence naturelle de la lumière, puisque la valeur de m, abstraction faite de signe, est toujours plus petite que celle de b.

Dans ce qui précède nous n'avons considéré que des points lumineux situés sur l'axe de la lentille, mais nous allons faire voir que les mêmes formules s'appliquent aussi aux points qui sont situés hors de l'axe, sous la condition que les *axes secondaires* correspondants ne fassent que des angles très-petits avec l'axe principal. On appelle axe secondaire la ligne menée par le *centre optique* de la lentille et par un point quelconque, pris hors de l'axe principal. Le centre optique est un point, placé dans l'intérieur de la lentille, et sur son axe, qui jouit de cette propriété que les rayons lumineux qui le traversent prennent en sortant de la lentille une direction parallèle à celle qu'ils avaient en entrant. Soient s (Fig. 30) un point lumineux, sat l'axe secondaire correspondant, sd et sd' des rayons arrivant à la lentille et réfractés par elle; tous ces rayons viennent concourir au même point t de l'axe secondaire, et les distances as et at, que nous désignerons par b et m, sont liées entre elles par la relation :

$$\frac{1}{b}+\frac{1}{m}=\frac{1}{f},$$

f étant la distance focale principale de la lentille. En effet, rapportons les points s et t en s'' et t'', en sorte que l'on ait aussi $as''=b$, $at''=m$, les triangles ass'', att'' pourront alors être considérés comme des triangles rectangles en s'' et en t''. Considérons le rayon incident sd et son rayon émergent dt : soient s'

Digitized by Google

et t' les points où ils coupent l'axe, b' et m' les distances correspondantes as' et at'; ces distances sont évidemment soumises à l'équation :

$$\frac{1}{b'}+\frac{1}{m'}=\frac{1}{f},$$

et, si la première équation est vraie, comme nous l'avons admis, il en résultera :

$$\frac{1}{b}+\frac{1}{m}=\frac{1}{b'}+\frac{1}{m'}.$$

Or, il est facile de voir que cette équation est en effet exacte, car en désignant par v l'angle des deux axes, par x' et z' les angles $ds'a$, $dt'a$, on a

$$\text{tang } x'=\frac{ad}{b'};\quad \text{tang } x'=\frac{ss''}{b-b'};\quad \text{tang } z'=\frac{tt''}{m'-m};$$

$$\text{tang } z'=\frac{ad}{m'};\quad \text{tang } v=\frac{ss''}{b};\quad \text{tang } v=\frac{tt''}{m};$$

d'où $$\frac{\text{tang } x'}{\text{tang } z'}=\frac{m'}{b'};\quad \frac{\text{tang } x'}{\text{tang } v}=\frac{b}{b-b'};\quad \frac{\text{tang } z'}{\text{tang } v}=\frac{m}{m'-m}.$$

En égalant les deux valeurs de $\frac{\text{tang } x'}{\text{tang } z'}$ qui résultent de ces trois dernières équations, l'on a

$$\frac{b(m'-m)}{m(b-b')}=\frac{m'}{b'},\quad \text{d'où}\quad \frac{1}{b}+\frac{1}{m}=\frac{1}{b'}+\frac{1}{m'},$$

ce qui démontre l'exactitude de l'équation

$$\frac{1}{b}+\frac{1}{m}=\frac{1}{f}$$

appliquée à l'axe secondaire *sat*.

Le *champ de la lentille* est mesuré par l'angle que peuvent faire les axes secondaires sans cesser de donner des images suffisamment exactes, tandis que l'*ouverture de la lentille* est l'angle sous lequel elle est vue du foyer principal, cet angle ne peut pas, en général, dépasser 10 ou 12°. Quand cet angle est plus grand, il y a *aberration de sphéricité*, c'est-à-dire que les rayons qui tombent vers les bords de la lentille ne concourent pas exactement avec ceux qui passent près du centre.

Il résulte de ce qui précède qu'un objet ss' (Fig. 31), qui serait compris dans le champ de la lentille et placé sur la sur-

Digitized by Google

face d'une sphère ayant son centre en a, donnerait une image renversée très-nette sur la surface tt' d'une autre sphère ayant le même centre. Ainsi, les objets font des images au foyer des lentilles comme au foyer des miroirs, et, vus du centre optique de la lentille, l'image et l'objet sont vus sous le même angle. Soient v cet angle, g et g' les grandeurs absolues de l'objet et de son image, il est facile de voir que l'on a :

$$g' = m \tan v, \quad \text{d'où} \quad g' = \frac{bf}{b-f} \tan v.$$

Lorsque les objets sont très-éloignés, b est très-grand par rapport à f, et la formule devient

$$g' = f \tan v.$$

Ainsi, l'angle moyen du soleil étant de 31′, son image a 9 millimètres au foyer d'une lentille de 1 mètre de distance focale principale.

Quand les objets ne sont pas très-éloignés, on peut remplacer tang v par sa valeur $\frac{g}{b}$, et la formule devient :

$$g' = \frac{gf}{b-f} \quad \text{ou} \quad g' = g\frac{m}{b}.$$

Il serait inutile de chercher ici les foyers des lentilles cylindriques, nous avons seulement représenté une de ces lentilles dans la figure 33 pour montrer que l'image d'un faisceau parallèle est sensiblement une ligne droite parallèle à l'axe du cylindre.

91. Lentilles de Fresnel et Phares. — Fresnel est parvenu à construire des lentilles de diverses formes au moyen desquelles la lumière des phares est projetée sur la mer à la distance de 12 ou 15 lieues, avec assez d'éclat pour indiquer aux navigateurs leur position précise, et signaler ainsi les écueils ou les dangers de la côte. Cette application a une si haute importance, et elle a été faite avec tant de succès, qu'il nous a semblé nécessaire d'en donner ici une idée. La figure 36 représente une *lentille annulaire* coupée par le milieu; elle se compose du segment de sphère a autour duquel on dispose plusieurs anneaux b, c, d, dont on voit la coupe b', c', d' (Fig. 35). La figure courbe de ces anneaux est calculée pour que chacun d'eux ait le même foyer f que le segment a; en

sorte qu'un fanal étant placé en *f*, toute la lumière émise sur la lentille par chaque point forme, après l'avoir traversée, un large faisceau qui est presque parallèle, car il le serait rigoureusement si tous les points lumineux du fanal pouvaient être rigoureusement à la distance focale principale. L'affaiblissement de l'intensité n'ayant lieu qu'à raison de la divergence des rayons d'un même faisceau, et à raison aussi de la divergence des axes des différents faisceaux, il en résulte qu'il est ici peu considérable, et qu'on peut éclairer par conséquent à une distance très-grande. On pourrait croire au premier abord que des lentilles ordinaires donneraient le même avantage; mais, comme nous l'avons remarqué, les lentilles ordinaires ne peuvent avoir qu'une ouverture de 12 ou 15°, tandis que les anneaux de la lentille de Fresnel sont calculés pour que son ouverture puisse atteindre plus de 40°; ces lentilles ramènent donc dans la même direction neuf fois plus de lumière, sans compter qu'étant beaucoup plus minces, elles en absorbent beaucoup moins. C'est d'après ces principes, mais en variant les formes des verres réfringents, que Fresnel a fondé un nouveau système d'éclairage dont la supériorité est maintenant reconnue par toutes les puissances maritimes de l'Europe. Nous indiquerons seulement la construction des *feux de ports* et celle des *feux tournants* du premier ordre. La figure 37 représente un *feu de port*. La lumière est donnée par une lampe d'Argant qui brûle 45 grammes d'huile à l'heure; la mèche a 2 centimètres de diamètre, et la flamme 5 centimètres de hauteur. Tous les rayons sont ramenés dans la direction horizontale, soit par réfraction, soit par réflexion. Le système réfringent se compose de cinq anneaux superposés *n*, dont la surface extérieure a une courbure convenable, et le système réfléchissant se compose de huit anneaux prismatiques *p*, cinq en haut et trois en bas, taillés et disposés de telle sorte que la lumière éprouve sur leurs grandes faces une réflexion totale, tandis qu'elle entre et sort par les autres faces sous une petite obliquité. Par cette combinaison, toute la lumière est ramenée dans une couche presque horizontale et d'une petite épaisseur; elle se projette avec le même éclat vers tous les points de l'horizon. Mais, par un système additionnel mobile, qui est représenté en *m* sur l'élévation et sur le plan (Fig. 38), Fresnel produit des *éclats* périodiques qui se renouvellent régulièrement, par exemple, trois fois par

Digitized by Google

minute. Ce système mobile se compose de deux lentilles cylindriques verticales supportées par le plateau *z*, qui est mis en mouvement par un poids au moyen des engrenages *y*; le plateau lui-même repose sur des galets *e* qui empêchent les frottements; les lentilles *m* ont aussi leur foyer au milieu de la flamme, et, par leur construction, chacune d'elles ramène dans un seul faisceau parallèle une portion considérable de la lumière. Ainsi, il y a deux segments de l'horizon qui sont beaucoup plus éclairés que le reste ; l'observateur qui se trouve sur un de ces points reçoit une vive lumière, mais, la lentille qui lui donne cet éclair continuant son mouvement de rotation, il y a un instant d'éclipse jusqu'à ce que la lentille suivante ait été ramenée dans cette direction. On comprend combien il importe de varier les effets de cette nature, et pour porter plus loin la lumière, et pour que les feux voisins sur une même côte puissent être distingués les uns des autres par les périodes différentes de leurs éclipses et de leurs éclats.

Pour les feux d'un ordre plus élevé, les distances focales doivent être plus grandes, et il serait trop difficile de travailler des anneaux de verre d'un diamètre suffisant; alors on y supplée en composant le système réfringent fixe de lentilles cylindriques horizontales pareilles à celle qui est représentée dans les figures 39, 40, 41. Ces lentilles, au nombre de 32, sont ajustées de manière à former un prisme à 32 pans, qui remplace le système circulaire précédent.

La figure 32 représente un feu tournant de premier ordre. Ici, la lumière est produite par 4 mèches concentriques qui brûlent 750 grammes d'huile par heure. Le système réfléchissant est fixe, et le système réfringent entièrement mobile. Le premier se compose de miroirs de verre étamés; ils sont disposés en *m*, comme on le voit sur la figure, formant 8 étages supérieurs et 5 étages inférieurs. Pour former le cercle de chaque étage, on emploie des pièces pareilles, en nombre plus ou moins grand; chaque pièce est travaillée de manière à présenter la courbure de la sphère osculatrice d'un paraboloïde de révolution, ayant la flamme pour foyer, et une ligne horizontale pour axe, comme on le voit dans la figure 34. Toute la lumière qui tombe sur les miroirs est donc réfléchie horizontalement. Le système réfringent est composé de 8 lentilles annulaires *a* pareilles à celle de la figure 36, portées au moyen de tiges de fer

Digitized by Google

sur le plateau z, qui est mis en mouvement comme dans le cas précédent.

Le tableau suivant contient les principaux résultats relatifs aux feux des différents ordres.

Ordre des feux.	Nombre des mèches.	Quantité d'huile consommée en une heure.	Hauteur de la flamme.	Diamètre de la flamme.	Portée des feux.
1	4	750 grammes.	9 centimèt.	9 centimèt.	9 à 15 lieues.
2	3	480 »	8 »	7 »	7 à 9 »
3	2	195 »	7 »	4,5 »	5 à 7 »
4	1	45 »	5 »	2 »	3 à 5 »

On sait que la portée des feux, ou la distance à laquelle ils sont visibles d'un point donné de l'horizon de la mer, dépend de la hauteur à laquelle ils sont placés; car, pour un observateur élevé de 5 mètres, le cercle de l'horizon réel est à environ 8000 mètres ou 2 lieues, et la distance augmente comme la racine carrée de l'élévation, de telle sorte que pour 500 mètres il est de 20 lieues.

CHAPITRE III.

Décomposition et Recomposition de la lumière.

92. La lumière blanche du soleil est composée de rayons diversement colorés. — Pour démontrer cette proposition fondamentale, on forme d'abord le *spectre solaire* par les procédés que nous avons décrits (PL. 33, FIG. 11), et qui sont reproduits (PL. 34, FIG. 1) : *m* est le miroir métallique ou le *porte-lumière* adapté au volet de la chambre noire : *o* est l'ouverture du volet dans laquelle on dirige le faisceau de lumière solaire ; elle a 1 ou 2 centimètres de diamètre ; *p* est le prisme réfringent ; *t* est le tableau sur lequel on reçoit les images. Avant de mettre le prisme, l'image directe est ronde et sans couleurs ; elle se forme en *g*. Au moyen du prisme, l'image réfractée est oblongue et colorée ; elle se forme en *ru* ; c'est le spectre solaire. La figure représente le tableau *t* rabattu et vu de face pour mieux montrer les effets.

En variant cette expérience, il est facile de constater les résultats suivants : 1° parallèlement aux arêtes du prisme, la largeur du spectre est toujours égale au diamètre de l'image directe qui serait reçue à la même distance ; 2° perpendiculairement aux arêtes, la longueur du spectre dépend de l'angle réfringent du prisme et de la nature de la substance.

Pour démontrer le premier résultat, il suffit de répéter l'expérience avec des prismes différents.

Pour démontrer le second, l'on peut employer le *prisme variable*, qui est représenté dans la figure 2. Le pied *p* et les deux bouts *b* et *b'* sont en cuivre, tandis que les deux faces *f* et *f'* sont des lames de verre montées dans des cadres de métal ; l'une d'elles est fixe, l'autre est mobile, et peut être parallèle ou inclinée à la première sous des angles différents. Cet appareil substitué au prisme *p* de la figure 1 n'imprime d'abord aucune déviation au faisceau direct, ce qui prouve le parallélisme des deux côtés dans chacune des lames *f* et *f'* ; mais lorsqu'on y verse un liquide transparent, on voit à l'instant le faisceau se

dévier et se décomposer. Ensuite, on fait varier à la fois la déviation et la coloration en inclinant plus ou moins la face f' sur la face f. Pour faire voir ensuite que la longueur du spectre dépend de la nature de la substance du prisme, on peut d'abord verser successivement divers liquides dans le *prisme variable* en lui conservant le même angle, et observer les longueurs des spectres correspondants; mais, pour les solides, on se sert du *polyprisme* qui est représenté dans la figure 3. Cet appareil est un assemblage de prismes de différentes substances superposés bout à bout et ayant tous le même angle réfringent; en le promenant devant l'ouverture, on oblige le faisceau à traverser successivement les diverses substances avec la même obliquité, et l'on obtient ainsi des spectres inégalement déviés et inégalement colorés.

Dans ces expériences, il est facile de reconnaître que si la longueur du spectre n'est pas au moins double de sa largeur, il se forme au milieu une bande blanche, mais, quand le spectre est très-allongé, le blanc disparaît, la séparation des couleurs est complète, et l'on y distingue les sept nuances suivantes : *rouge*, *orangé*, *jaune*, *vert*, *bleu*, *indigo*, *violet*.

Il importe de remarquer qu'elles sont toujours dans le même ordre relatif, et que, par rapport au prisme, c'est toujours le rouge qui éprouve la moindre déviation. Ce sont ces nuances que l'on appelle ordinairement les *couleurs du prisme*, les *couleurs du spectre*, les *couleurs de l'iris* ou *de l'arc-en-ciel*, les *couleurs simples*, etc.; mais nous verrons que, si nos yeux ne comptent que sept couleurs dans le spectre, il est vrai de dire cependant qu'il y en a une infinité.

La séparation des couleurs a lieu d'une manière assez complète, quand on reçoit le spectre à 6 mètres de distance, le prisme ayant un angle réfringent de 60°, et l'ouverture du volet étant un cercle de 1 centimètre de diamètre. Cependant elle est plus complète encore quand l'ouverture est plus petite : c'est ce que l'on peut vérifier en faisant tomber simultanément sur le prisme plusieurs faisceaux par des ouvertures voisines de différents diamètres, ou, mieux encore, en faisant tomber un seul faisceau par un triangle isocèle très-allongé dont la hauteur soit parallèle aux arêtes du prisme.

Pour donner au spectre des limites plus nettes et mieux tranchées, on peut encore adopter la disposition suivante qui a

Digitized by Google

été employée par Newton. A 4 mètres de l'ouverture *o* (Fig. 5), on place une lentille ayant 2 mètres de distance focale principale, sur laquelle on fait tomber un faisceau de lumière solaire; alors l'image de l'ouverture va se peindre de grandeur naturelle en *o'*, à la même distance de 4 mètres; mais, immédiatement derrière la lentille, on place le prisme *p*, qui décompose la lumière incidente, et donne un spectre qui est nettement défini et très-brillant, parce qu'il contient dans un moindre espace toute la lumière qu'il contiendrait si la lentille n'y était pas.

93. **Les rayons diversement colorés sont diversement réfrangibles.** — Cette vérité résulte déjà de la forme dilatée du spectre; car il est évident que la lumière violette, qui tombe en *u* (Fig. 1), forme, au sortir du prisme, un angle d'émergence plus grand que la lumière rouge qui tombe en *r*; et, comme elles ont l'une et l'autre une même incidence sur la première face du prisme, il faut bien en conclure que le violet est plus réfrangible que le rouge. Le même raisonnement fait voir que les nuances intermédiaires ont des réfrangibilités intermédiaires.

Mais voici des expériences qui conduisent à la même conséquence d'une manière plus frappante.

1° On reçoit le spectre sur un écran *a* (Fig. 4), percé d'une petite ouverture *o'*; derrière cette ouverture, on fixe dans une position déterminée un second prisme qui fait éprouver une seconde réfraction à la lumière, et l'on marque sur le tableau *t* le point où vient tomber l'image. Or, en faisant tourner le premier prisme on peut faire passer successivement toutes les nuances par l'ouverture *o'* de l'écran, et l'on reconnaît ainsi que le violet, qui tombe en *u'* après la seconde réfraction, est plus réfrangible que le rouge qui tombe en *r'*.

2° L'expérience des *prismes croisés* conduit au même résultat; elle est encore plus simple et plus facile. On marque sur le tableau le lieu *o* de l'image solaire qui est formée par le faisceau direct (Fig. 6); ensuite, on place derrière l'ouverture du volet un prisme *horizontal*, qui produit sur le tableau un spectre *ru*; enfin, on place un prisme *vertica* derrière le premier, et l'on obtient un spectre *r'u'*. Par ce second prisme, la lumière rouge, qui allait tomber en *r*, est réfractée en *r'*, et la lumière violette, qui allait tomber en *u*, est réfractée en *u'* : l'obliquité du spectre *r'u'*, est une preuve que la réfrangibilité va croissant depuis le rouge jusqu'au violet, puisque toutes les couleurs ayant la même

Digitized by Google

incidence à leur entrée dans le second prisme ont en sortant des angles d'émergence croissant depuis le rouge jusqu'au violet.

3° On fait tomber successivement toutes les nuances du spectre sur une carte imprimée en caractères très-fins, et après avoir placé au-devant de cette carte une lentille ayant une grande distance focale principale, on va recevoir, à une distance convenable, sur un carton blanc, l'image des lettres au point où elles sont le plus nettement dessinées ; on reconnaît ainsi que, pour la lumière rouge, le carton doit être très-sensiblement plus loin que pour l'orangé, et pour celle-ci plus loin que pour le jaune, etc., etc.

Les expériences précédentes ne s'appliquent pas seulement aux sept nuances que nous avons remarquées dans le spectre, mais elles s'appliquent aussi aux divers rayons d'une même nuance. Par exemple, le rouge *r*, qui est tout à fait à l'extrémité du spectre (Fig. 5), et que l'on appelle pour cette raison le *rouge extrême*, se trouve sensiblement moins réfrangible que le *rouge moyen*, et à plus forte raison moins réfrangible que le *rouge limite de l'orangé*. Il en est de même de tous les rayons dans toute la longueur du spectre, depuis le *rouge extrême* jusqu'au violet extrême. C'est cette réfrangibilité graduellement croissante qui nous a conduits à admettre qu'il y a dans la lumière blanche une *infinité* de couleurs différentes, et, d'après ce principe, le spectre peut être analysé de la manière suivante :

Imaginons pour un instant qu'il n'y ait dans la lumière blanche que le rouge extrême et le violet extrême; alors il est clair qu'au lieu d'un spectre, nous aurions seulement deux images du soleil, rondes, colorées et séparées, l'une rouge en *r*, et l'autre violette en *u* (Fig. 7) : mais le rouge qui avoisine le rouge extrême, et qui est un peu plus réfrangible que lui, donne aussi une image ronde qui se superpose en grande partie sur la première, en se rapprochant du violet; le rouge suivant donne encore une image pareille, qui se superpose en grande partie sur la précédente, et ainsi de suite jusqu'au violet extrême. Ainsi dans les expériences ordinaires, le spectre est composé d'une infinité d'images circulaires empiétant les unes sur les autres, et, rigoureusement parlant, une zone étroite quelconque *ab*, faisant partie d'un grand nombre de cercles voisins, se trouve composée d'un grand nombre de lumières qui diffèrent en couleur et en réfrangibilité : seulement, si les cercles

Digitized by Google

sont d'un petit diamètre, les couleurs seront à peu près identiques, et les réfrangibilités à peu près égales; c'est pourquoi cette zone peut être considérée comme composée d'une seule et même lumière.

94. Chaque couleur du spectre est une couleur simple. — Une couleur est simple quand elle se retrouve toujours la même, sans qu'il soit possible par aucune action d'en faire sortir des nuances différentes; et nous allons faire voir qu'en effet les couleurs du spectre peuvent bien être détruites, mais qu'elles ne peuvent par aucune cause être modifiées pour nos yeux.

1° Après avoir isolé, avec un écran percé d'un petit trou, un pinceau quelconque du spectre, le violet, par exemple, on peut le faire passer par un nombre quelconque de prismes, de lentilles ou d'autres corps réfringents, sans y découvrir d'autre nuance que le violet primitif (Fig. 4).

2° Si l'on fait tomber ce pinceau violet sur un corps d'une couleur différente, rouge, jaune, vert, etc., ce corps devient violet, sans qu'on puisse y découvrir aucune trace de la couleur primitive qu'il offre naturellement et qui lui semble propre et inhérente. On en peut faire l'expérience sur les feuilles des plantes, sur les fleurs, le vermillon, l'or, etc., etc.; tous ces corps prennent alors la même nuance, ils deviennent violets, comme si cette couleur était leur véritable couleur naturelle. Pareillement, dans le rouge, tous les corps sont rouges, jaunes dans le jaune, verts dans le vert, etc.

3° Un pinceau violet qui se présente pour traverser un corps diaphane rouge, jaune ou vert, se trouve absorbé et détruit, ou bien, s'il passe, il est violet à sa sortie comme il l'était à son entrée. Cette expérience est surtout frappante avec des verres colorés en rouge : tel de ces verres laisse passer librement la lumière violette, tel autre l'absorbe en totalité, bien qu'à les regarder tous deux à la lumière du ciel ils paraissent également colorés et également transparents : celui qui absorbe le violet absorbe, en général, toutes les autres nuances du spectre, excepté le rouge, ainsi, c'est un corps *transparent pour le rouge* et plus ou moins *opaque pour les autres couleurs*.

On dit quelquefois, d'après Newton, que la lumière simple est homogène : mais cette expression est inexacte, parce qu'elle semble indiquer que toutes les parties de cette lumière éprouvent toujours les mêmes effets. Or, il est facile de vérifier qu'un

Digitized by Google

rayon de lumière simple est en partie réfléchi à la surface d'un corps diaphane, et en partie réfracté dans son intérieur ; ainsi, ces deux parties ne sont pas identiques, puisqu'elles éprouvent des effets différents. Il en est de même lorsqu'on fait tomber un pinceau de lumière simple sur un corps doué de la double réfraction, car ce pinceau se partage alors en deux autres qui suivent des routes différentes. En général, il n'arrive presque jamais qu'un rayon simple du spectre éprouve identiquement les mêmes effets dans tout son ensemble.

95. **On recompose la lumière blanche en ramenant toutes les couleurs simples dans la même direction ou en les faisant toutes concourir au même point.** — Quand les couleurs ont été séparées par un prisme, on peut les ramener dans la même direction par un second prisme de même substance et de même angle réfringent que le premier, mais tourné en sens inverse (Fig. 8). Alors le faisceau, qui est coloré entre les deux prismes, devient blanc au sortir du second, et va peindre sur le tableau une image ronde du soleil. Si le second prisme est à larges faces, on peut le placer très-loin du premier, de telle sorte qu'il reçoive le spectre très-complet. Cette expérience montre assez clairement qu'il n'y a dans un prisme aucune force particulière pour décomposer la lumière blanche ou pour la recomposer, mais que la séparation des couleurs simples ou leur réunion se fait d'elle-même par l'inégale réfrangibilité des divers rayons. Pour opposer deux prismes qui soient exactement de même angle, on peut encore employer une cuve rectangulaire de glace, séparée en deux compartiments prismatiques par une cloison diagonale, pareillement en glace *cc'* (Fig. 9). Lorsqu'on met de l'eau dans le premier compartiment, le faisceau émergent forme un spectre ; mais il reprend sa direction et sa blancheur primitives dès qu'on remplit d'eau le second compartiment comme le premier.

Il n'est pas nécessaire que toutes les couleurs simples soient, comme dans l'expérience précédente, ramenées dans la même direction pour former du blanc : il suffit seulement qu'elles concourent au même point, comme nous allons le voir par les expériences suivantes.

1° On reçoit le spectre sur un grand miroir concave *m* (Fig. 10), et l'on dirige le faisceau réfléchi, soit dans le faisceau incident lui-même, soit au dehors, comme le représente la figure. Alors, toutes les nuances du spectre réfléchies dans des directions d f-

Digitized by Google

férentes viennent concourir au même point f, et là, l'image solaire reçue sur un petit écran ou sur un verre dépoli paraît d'une blancheur éblouissante, comme si le faisceau incident était un faisceau de lumière blanche. Il suffit donc du concours de toutes les nuances simples pour produire du blanc. Mais si, au lieu de recevoir le faisceau réfléchi au foyer même où le concours est complet, on le reçoit plus près ou plus loin du miroir, on n'observe qu'une recomposition imparfaite : plus près, les couleurs extrêmes du spectre reparaissent dans leur ordre; plus loin, elles reparaissent dans un ordre inverse. Enfin, si l'on place au foyer un petit miroir métallique très-poli m', il n'y a aucun doute que la lumière qui tombe sur lui ne soit blanche comme celle qui tombait tout à l'heure sur l'écran, et cependant l'image réfléchie par ce miroir est un spectre; ce qui prouve évidemment qu'en se réunissant au foyer les divers rayons conservent leur existence indépendante et ne se modifient nullement les uns les autres.

2° On reçoit le spectre sur une lentille l (Fig. 11), et au point f où convergent tous les rayons divers on obtient une lumière blanche comme au foyer du miroir précédent. L'image ronde qui en résulte est seulement colorée vers ses bords, parce que les rayons de réfrangibilités différentes ne peuvent pas faire leur foyer exactement à la même distance derrière la lentille. Au delà du foyer le spectre reparaît, mais renversé en $r'u'$, ce qui est une nouvelle preuve que les rayons peuvent se croiser au même point sans se modifier, et que chacun d'eux se comporte toujours comme s'il était seul.

3° Il y a enfin un *moyen mécanique* de recomposer la lumière blanche, dont l'effet semble toujours fort surprenant. Imaginons un cercle de carton, ayant environ 8 décimètres de diamètre, percé en son centre d'un petit trou, et offrant deux zones peintes en noir, l'une près du centre, l'autre près du bord. Dans l'intervalle de ces deux zones on colle de petites bandes de papier; la première d'un rouge qui imite autant qu'il est possible le rouge du spectre, la deuxième orangée, la troisième jaune, etc.; quand la période des sept nuances est épuisée, on recommence dans le même ordre pour achever le cercle, avec l'attention que toutes les périodes soient complètes, et que dans chacune d'elles les bandes aient des largeurs à peu près proportionnelles à l'espace que les diverses couleurs occupent dans la longueur du spectre. Lorsqu'un tel carton est mis en mouvement rapide autour de

Digitized by Google

son centre, soit avec la main sur une tige qui passe par l'ouverture centrale, soit par quelque autre moyen, toutes les nuances des bandes colorées disparaissent, et l'intervalle des zones noires paraît d'un blanc plus ou moins complet. Ce phénomène singulier peut s'expliquer de la manière suivante : s'il n'y avait qu'une seule bande rouge sur un fond noir, on verrait par la rotation un cercle rouge, comme dans l'expérience si connue du charbon allumé que l'on tourne en rond avec une grande rapidité; s'il n'y avait qu'une seule bande violette, on verrait par la même raison un cercle violet, puis un cercle vert pour une bande verte, etc. Or, si toutes ces bandes existent et tournent en même temps, on verra à la fois au même lieu un cercle rouge, un orangé, un jaune, etc., et par conséquent un cercle blanc, puisque la sensation du blanc n'est que la sensation simultanée de toutes ces nuances.

96. Des couleurs complémentaires et des nuances produites par le mélange de diverses couleurs simples en diverses proportions. — Puisque toutes les couleurs simples, prises ensemble dans leur *proportion naturelle* (c'est-à-dire dans la proportion que donne le spectre), reproduisent la lumière blanche, il est évident que, pour altérer la blancheur, il suffit de supprimer l'une des couleurs simples, ou seulement d'en altérer la proportion. Ainsi, en supprimant le rouge dans le spectre, et en composant entre elles toutes les couleurs restantes, on obtient une teinte bleuâtre; cette teinte mêlée au rouge reproduit du blanc. Toutes les fois que deux couleurs simples ou composées remplissent cette condition, c'est-à-dire toutes les fois que, mêlées ensemble, elles reproduisent du blanc, elles sont dites *complémentaires* l'une de l'autre. Il n'y a pas de couleur, quelle qu'elle soit, qui n'ait sa couleur complémentaire; car, si elle n'est pas blanche, il lui manque seulement quelques-uns des éléments de la couleur blanche, et ces éléments mélangés entre eux forment sa couleur complémentaire. Mais, si au mélange de ces éléments on ajoutait du blanc en diverses proportions, on aurait autant de nuances différentes, qui seraient toutes également efficaces pour reproduire la couleur blanche avec la couleur donnée. Il y a donc rigoureusement une infinité de nuances différentes qui ont la même couleur complémentaire, et une infinité de nuances complémentaires qui appartiennent à la même couleur donnée. La plupart des verts ont

Digitized by Google

pour couleurs complémentaires des violets plus ou moins rougeâtres, et les jaunes des indigos plus ou moins violacés. Pour étudier, par l'expérience, les teintes qui résultent de plusieurs couleurs simples mélangées, on peut employer un appareil composé de sept miroirs : on le place à une grande distance du prisme pour que le spectre soit bien étalé, et l'on incline convenablement les miroirs pour diriger en un même point d'une feuille de papier blanc celles des nuances dont on veut observer la composition. Il paraît que Newton a fait un grand nombre d'expériences sur ce sujet, soit par cette méthode, soit par d'autres analogues, et il est ensuite parvenu à une construction géométrique très-remarquable qui représente avec une fidélité étonnante le résultat de toutes ces expériences. Nous pouvons seulement décrire cette construction et en indiquer l'usage; car Newton, après l'avoir vérifiée par l'expérience, ne l'a justifiée par le raisonnement dans aucun de ses ouvrages, et personne jusqu'à présent n'a pu deviner la liaison cachée qu'elle a sans doute ave la théorie.

On divise la circonférence du cercle *rojvbiu* (Fig. 12) en sept parties qui aient les grandeurs suivantes :

$ro =$	$60°$	$45'$	$34''$
$oj =$	34	10	38
$jv =$	54	41	1
$vb =$	60	45	34
$bi =$	54	41	1
$iu =$	34	10	38
$ur =$	60	45	34

En supposant que ces sept arcs représentent les sept couleurs simples, savoir *ro* le rouge, *oj* l'orangé, etc., leurs centres de gravité r', o', j', v', b', i', u', ainsi que le centre de gravité c de la circonférence entière, représentent les points d'application des forces qu'il faut composer entre elles pour avoir la nuance qui résulte de plusieurs couleurs simples données.

D'abord, si l'on veut savoir la couleur que donne le mélange de toutes les nuances, il faut composer ensemble les forces correspondantes aux sept centres de gravité des sept arcs, comme on compose les forces parallèles; leur résultante passant évidemment par le centre, c'est une preuve que la nuance du mélange est le blanc parfait.

Digitized by Google

Pour composer, par exemple, le rouge avec une certaine proportion de blanc, il faudra attribuer au centre de gravité c une certaine valeur dépendante de la proportion de blanc que l'on veut mélanger : cette valeur sera égale à la somme des valeurs des centres de gravité r', o', j'', etc., si la proportion de blanc est celle qui résulte du mélange de toutes les nuances; elle en sera la moitié, si l'on ne prend qu'une proportion de blanc moitié, etc. : ensuite on composera ce centre de gravité avec r', la résultante tombant évidemment sur la ligne $r'c$; c'est une preuve que la teinte du mélange sera rougeâtre, et d'autant plus lavée de blanc que la résultante tombera plus près du centre c. On agirait de même pour composer avec du blanc l'une quelconque des nuances simples.

En suivant la même règle, il est facile de voir :

1° Que deux couleurs simples consécutives donnent toujours par leur mélange une nuance intermédiaire. Le rouge et l'orangé donnent un rouge plus voisin de l'orangé, ou un orangé plus voisin du rouge, etc. Newton cependant recommande de ne pas appliquer cette règle au rouge et au violet, qui ne se suivent pas dans le spectre.

2° Que deux couleurs distantes d'un rang donneront, par leur mélange, la couleur qui les sépare. Ainsi,

Le rouge et le jaune	donnent	de l'orangé.
L'orangé et le vert	»	du jaune.
Le jaune et le bleu	»	du vert.
Le vert et l'indigo	»	du bleu.
Le bleu et le violet	»	de l'indigo.

Mais l'indigo et le rouge donnent une espèce de pourpre qui diffère sensiblement du violet.

3° Que deux couleurs distantes de deux rangs donnent aussi l'une des nuances qui les séparent, mais que cette nuance est comme si elle était lavée d'une assez grande quantité de blanc.

On peut appliquer aisément le calcul à cette construction empirique, et trouver la nuance qui résulte du mélange d'un nombre quelconque de couleurs simples prises dans des proportions quelconques.

97. Toute lumière composée éprouve en se réfractant une décomposition et une recomposition. — Suivons maintenant la marche d'un pinceau de lumière blanche qui traverse oblique-

Digitized by Google

ment une lame à faces parallèles. Soit *a* (Fig. 13) la face supérieure de cette lame, *b* sa face inférieure, et *li* la direction du pinceau incident qui sera supposé venir de l'infini. Le rayon *li* sera décomposé par la réfraction en une infinité de rayons diversement colorés, depuis le rouge extrême qui prendra la direction *ir*, jusqu'au violet extrême qui prendra la direction *iu*; et, la loi de Descartes s'appliquant au premier comme au dernier, chacun d'eux produit un rayon émergent parallèle à *li*, ce qui donne en somme un petit pinceau parallèle dont les rayons entre *re* et *ue* présentent toutes les nuances du spectre. Ce résultat semble d'abord contraire à l'expérience, car on sait que la lumière blanche n'est pas décomposée en traversant les lames parallèles, quelle que soit leur nature : mais il suffit de considérer l'ensemble des rayons voisins du rayon *li* pour se rendre compte de cette contradiction apparente. En effet, *l'i'*, par exemple, donne comme *li* dans l'intérieur de la lame un pinceau dilaté qui présente toutes les nuances du spectre, et à l'extérieur un pinceau parallèle *r'e'*, *u'e'*, en tout pareil à *re*, *ue*; de plus, chacun des rayons du second est parallèle à son homologue dans le premier. Il en serait de même de tous les rayons compris entre *li* et *l'i'*, et c'est là précisément ce qui explique la blancheur du faisceau émergent : car il y a près de *li* un rayon incident qui donne un rayon orangé suivant *re*; un peu plus loin, il y en a un autre qui donne un rayon jaune suivant la même ligne, un autre qui en donne un vert, un autre un bleu, etc. D'où il résulte enfin que tous les rayons émergents sont des rayons blancs, excepté toutefois ceux qui se trouvent aux bords du pinceau en *re* et *e'u'*; mais ceux-ci sont en général modifiés par la diffraction, et il n'est pas possible d'y reconnaître les nuances que la simple décomposition leur donne.

On voit en même temps que la décomposition subsiste dans l'intérieur même de la lame, et l'œil qui serait placé quelque part dans son épaisseur, recevant les rayons rouges dans une direction et les violets dans une autre, verrait en des points différents le rouge, le violet et les nuances intermédiaires, c'est-à-dire qu'il distinguerait un spectre au lieu d'une image blanche. Cependant les corps éclairés par ces divers rayons seraient comme s'ils étaient éclairés par des rayons blancs, parce que les rayons qui concourent en un point d'un corps opaque, en suivant des

Digitized by Google

directions peu différentes, produisent le même effet que s'ils arrivaient en ce point dans la même direction.

L'analyse précédente nous fait voir que c'est aux surfaces des corps réfringents que s'accomplissent à la fois les réfractions, les décompositions et les recompositions de la lumière. Nous pourrions citer un grand nombre d'exemples de ces phénomènes, mais nous nous bornerons à indiquer encore deux expériences qui montrent d'une manière assez curieuse le jeu de ces décompositions et recompositions successives.

1° Lorsqu'on fait tomber un petit pinceau de lumière solaire sur un prisme équilatéral *abc* (Fig. 14), dans une direction convenable *li*, et au tiers à peu près de son côté, on observe six images autour du prisme; chaque face en donne deux, l'une blanche, et l'autre colorée formant un spectre complet. En suivant sur la figure la marche de la lumière, on pourra facilement se rendre compte de ce phénomène.

2° On forme une image du soleil au foyer d'une lentille au moyen d'un large faisceau de lumière directe (Fig. 15), ensuite on présente un carton blanc successivement au foyer, puis à une moindre, puis à une plus grande distance de la lentille : au foyer, en *c*, l'image est complétement blanche; plus près de la lentille, en c', elle est blanche au centre et entourée vers ses bords d'une auréole rouge et jaune; plus loin, en c'', elle est encore blanche au milieu, mais vers ses bords elle est entourée d'une auréole bleue et violette.

Ce premier résultat est facile à expliquer : chaque rayon incident est décomposé par la lentille comme il le serait par un prisme; il en résulte par conséquent un nombre infini de spectres annulaires dont la superposition est tantôt complète, tantôt imparfaite. Le rouge, comme moins réfrangible, va faire son foyer plus loin en *r*, tandis que le violet fait son foyer en *u* : ainsi, quand le tableau est en c', on a une image blanche hh' avec une auréole *gh*, $g'h'$, dont le rouge est en dehors; quand il est en c'', on a une image blanche nn' avec une auréole violette *vn*, $v'n'$; enfin, quand il est en *c*, on a une image bb' complétement blanche, parce que les rayons violets qui se sont croisés en *u* viennent tomber au même point que les rayons rouges qui vont se croiser en *r*. Mais le célèbre professeur Charles avait coutume, dans ses leçons, de rendre l'expérience plus piquante par l'artifice suivant : on découpe dans une carte (Fig. 16) un

Digitized by Google

petit anneau dans l'intérieur duquel il reste un cercle plein, d'un diamètre un peu plus grand que bb' (Fig. 15); cette carte, placée en bb', arrête toute la lumière, et le tableau plus ou moins éloigné ne reçoit aucune image; ensuite, on meut graduellement la carte, soit pour l'approcher, soit pour l'éloigner de la lentille, et en la tenant toujours de manière que le centre de l'anneau découpé coïncide avec l'axe du faisceau : alors, dans le premier cas, on voit paraître sur le tableau une large auréole de lumière rouge très-vive, puis une autre auréole jaunâtre, et enfin une auréole blanche; et, dans le second cas, les auréoles qui se succèdent sont violettes, bleues ou blanches, et toujours très-éclatantes.

98. Les couleurs naturelles des corps sont en général des couleurs composées. — Le prisme, qui vient de nous servir à décomposer la lumière solaire, peut être employé avec le même succès pour analyser les diverses couleurs naturelles des corps. Les phénomènes qui se présentent alors sont très-variés; mais il nous suffira d'indiquer les conditions sous lesquelles ils se produisent, et le principe qui sert à les expliquer.

1° Au milieu d'une feuille de papier noir, on pose à la suite l'une de l'autre deux petites bandes de papier r et u, l'une rouge et l'autre violette, de 1 ou 2 centimètres de longueur et de 1 millimètre de largeur (Fig. 17); puis on les regarde avec un prisme à quelques décimètres de distance, en tenant les arêtes du prisme parallèles à la longueur des bandes. On aperçoit alors une image déviée de chaque bande; mais l'image violette u est bien plus relevée vers le sommet du prisme que n'est l'image rouge r. Ainsi le violet est plus réfrangible que le rouge, et c'est par l'inégale réfrangibilité que l'on voit au travers du prisme les deux bandes séparées, tandis qu'on les voit unies et sur la même ligne lorsqu'on les regarde directement.

2° Si au lieu de peindre l'une des bandes en rouge et l'autre en violet, on mélange d'abord les deux couleurs ensemble, pour peindre une seule bande p avec la couleur composée, qui est une espèce de pourpre, alors, au travers du prisme, cette bande p donne à elle seule deux images distinctes et séparées r et u, l'une rouge et l'autre violette. Ainsi, la puissance réfringente du prisme sépare les deux couleurs élémentaires qui composent le pourpre, et dévie chacune de ces couleurs suivant les lois qui lui sont propres, exactement comme si elles provenaient d'un corps lumineux par lui-même.

Digitized by Google

3° Les corps qui sont naturellement blancs ne pouvant tirer leur blancheur que de la lumière qui les éclaire, on peut juger d'avance que leur couleur doit reproduire toutes les nuances du spectre, comme le pourpre de l'expérience précédente a reproduit les nuances élémentaires de rouge et de violet qui entraient dans sa composition.

En effet, une petite bande *b* de papier blanc (Fig. 17), regardée avec le prisme, ne donne plus aucune trace de couleur blanche dans son image *ur*; mais, si elle est assez étroite, elle donne, d'une manière parfaitement distincte, le rouge, l'orangé, le jaune, le vert, le bleu, l'indigo et le violet, dans le même ordre et avec les mêmes proportions que la lumière solaire.

4° Une large bande de papier blanc *b'* (Fig. 17) présente d'autres apparences : vers le milieu de l'image, toutes les couleurs simples se trouvent superposées et reproduisent du blanc; mais en même temps la recomposition est incomplète vers les bords, et l'on aperçoit d'un côté des bandes violettes, indigo, bleues, et de l'autre des bandes rouges, orangées, jaunes.

5° Une large bande noire *n* (Fig. 17) sur un fond blanc présente, au travers du prisme, des phénomènes qui sont précisément l'inverse des précédents : le milieu de l'image est noir; et, à partir de ce milieu, les bandes colorées sont successivement rouges, orangées, jaunes, vers le haut; et violettes, indigo, bleues, vers le bas. Pour se rendre compte de cette inversion, il suffit de remarquer que les couleurs résultent de l'espace blanc qui limite la bande noire *n* : celles d'en haut proviennent du fond blanc qui est immédiatement au-dessus de *n*, et celles d'en bas proviennent du fond blanc qui est immédiatement au-dessous.

6° Une bande noire *n'* très-étroite (Fig. 17) ne donne plus de noir au milieu; son image se compose simplement de bandes rouges et violettes, au dehors desquelles se trouvent d'un côté l'orangé et le jaune, et de l'autre l'indigo et le bleu. C'est comme si le milieu noir de l'expérience précédente diminuait de plus en plus au point de disparaître.

7° Toutes les couleurs naturelles peuvent être analysées par le même procédé; il y a cependant deux causes qui empêchent l'analyse d'être parfaitement exacte : le fond sur lequel on les dispose n'est jamais absolument noir, même quand c'est une surface soigneusement noircie au noir de fumée, et les objets colo-

rés, feuilles, fleurs, plumes, écailles, pierres précieuses, etc., ont presque tous la propriété de réfléchir à leur première surface une portion de la lumière incidente sans lui imprimer de coloration. Cette lumière blanche plus ou moins intense renvoyée par le fond et par l'objet lui-même, donne en traversant le prisme des nuances étrangères, qui se mêlent aux nuances propres de la matière qui est soumise à l'expérience.

8° Les verres colorés et en général les corps translucides sont essayés par un autre moyen : on regarde avec le prisme la lumière solaire qui les a traversés; si cette lumière est encore composée, le prisme en sépare les nuances; si elle est simple, le prisme n'en modifie ni la forme ni la couleur. Il n'y a que certains verres rouges anciens qui donnent de la lumière simple.

La lumière que nous pouvons produire artificiellement, soit par la combustion, soit, en général, par les forces chimiques, soit par les actions physiques ou mécaniques, peut être analysée par le même moyen, et toutes les expériences qui ont été faites sur ce sujet conduisent jusqu'à présent aux deux conséquences suivantes :

1° La lumière artificielle, quelle que soit son origine, ne contient aucune nuance simple qui ne se retrouve dans la lumière solaire.

2° Il n'existe aucune lumière artificielle, qui reproduise les nuances simples de la lumière solaire avec leurs intensités et leurs proportions relatives. La nuance qui domine dans une lumière artificielle est aussi la nuance qui domine dans le spectre que l'on obtient en la regardant avec un prisme. Ainsi les flammes rouges, jaunes, vertes ou bleues, donnent des spectres où la couleur dominante est le rouge, le jaune, le vert ou le bleu. Cependant, lorsqu'on brûle, avec une mèche d'éponge, de l'alcool étendu d'eau et très-salé, l'on obtient une flamme jaune dont la lumière est presque de la lumière simple : c'est par ce moyen que M. Brewster forme sa *lampe monochromatique*, qui peut être utile pour éclairer les objets dans les observations microscopiques, et pour faire diverses expériences de polarisation ou de diffraction.

CHAPITRE IV.

Des Raies du spectre, de la Dispersion et de l'Achromatisme.

99. Raies du spectre. — Nous appellerons raies du spectre les changements brusques d'intensité que Frauenhofer a découverts dans les spectres de diverses lumières. Ces changements se présentent tantôt sous l'apparence de lignes noires ou presque complétement noires, tantôt sous l'apparence de lignes brillantes.

La figure 19 représente ce phénomène singulier, pour la lumière solaire : *ru* est le spectre ordinaire où sont marqués les espaces occupés par les diverses couleurs, et *r'u'* offre les principales raies que l'on y distingue ; elles sont toujours noires, et, en concevant que cette figure soit projetée sur la première, on aura une idée des positions de ces diverses raies par rapport aux nuances du spectre. On voit d'abord qu'elles ne tombent pas aux limites des couleurs, mais qu'elles se trouvent réparties depuis le rouge au violet avec une grande irrégularité, sans rien offrir de remarquable au passage du rouge à l'orangé, de l'orangé au jaune, etc. On peut remarquer ensuite qu'il n'y a pas moins d'irrégularité dans leur apparence que dans leur position : les unes sont très-déliées et ne paraissent que comme des lignes noires isolées et à peine visibles ; d'autres sont très-rapprochées, et ressemblent plutôt à une ombre qu'à un assemblage de lignes distinctes ; enfin, il y en a quelques-unes qui sont très-tranchées et paraissent avoir une étendue sensible. Pour établir quelques points de repère au milieu de cette confusion, Frauenhofer a choisi les sept raies qui sont marquées *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g*, *h*, comme offrant le double avantage d'être faciles à reconnaître et de partager le spectre en espaces qui ne sont pas trop inégaux. De *b* à *c* on compte 9 raies fines et bien déterminées ; de *c* à *d* on en compte 30 ; de *d* à *e*, environ 84 de différentes grosseurs ; de *e* à *f*, plus de 76, entre lesquelles on en distingue trois des plus fortes du spectre et des mieux terminées ; de *f* à *g*, 185, et de *g* à *h* 190 : ce qui fait 574 de *b* à *h*. Si l'on compte encore celles

Digitized by Google

qui sortent de ces limites, on peut évaluer à 600 ou à 700 le nombre total des raies noires ou plus ou moins sombres que présente le spectre solaire dans toute sa longueur.

On peut observer ce phénomène, soit en projetant le spectre entier sur un tableau, soit en recevant successivement les diverses couleurs du spectre dans une lunette convenablement disposée et donnant une amplification suffisante. Dans les deux cas, la lumière ne doit arriver au prisme qu'après avoir traversé une fente parallèle à ses arêtes et très-étroite dans le sens perpendiculaire; alors, si l'on veut projeter les franges sur un tableau, on dispose l'expérience comme celle de la figure 5 : *o* représente la fente, *p* le prisme, et *l* une lentille; dans l'expérience de Newton, à laquelle se rapporte cette figure, la lentille était sphérique et ses distances à l'ouverture *o* et au tableau *ur* étaient doubles de la distance focale principale. Pour le cas qui nous occupe, on pourrait prendre une lentille cylindrique; mais, qu'elle soit cylindrique ou sphérique, il est bon qu'elle produise un grossissement plus ou moins considérable, et pour cela il faut qu'elle soit plus près de la fente que du tableau, de telle sorte que ces distances correspondent à des distances focales conjuguées : un grossissement de 8 ou 10 fois permet de voir d'une manière très-nette toutes les raies principales du spectre; il semble toutefois qu'il y ait quelque avantage à placer la lentille à la suite du prisme plutôt qu'en avant.

Pour observer les raies dans une lunette, on dispose l'expérience comme dans la figure 18 : *o* est la fente étroite, *p* le prisme et *l* la lunette; ici surtout le prisme doit être très-pur, sans stries ni filandres, il est bon de le placer à 6 ou 7 mètres de la fente; et, soit en faisant tourner son support, soit en faisant tourner la lunette mobile elle-même, on parvient à étudier le spectre dans toute sa longueur; la lunette fixe sert à déterminer les déviations et par suite les indices de réfraction correspondant aux raies principales; la position du minimum de déviation est celle qui donne aux raies la plus grande netteté.

Par ce mode d'observation, Frauenhofer a constaté 1° que les raies sont tout à fait indépendantes de l'angle réfringent du prisme, et 2° qu'elles sont pareillement indépendantes de la nature de la substance réfringente, c'est-à-dire que, dans tous les cas, elles restent les mêmes pour leur nombre, leur forme et leur disposition.

Digitized by Google

Jusqu'à présent on a trouvé une identité si absolue entre la lumière du soleil et toutes les autres lumières naturelles ou artificielles, qu'il était très-important de chercher si cette identité se soutiendrait encore à la nouvelle épreuve des raies du spectre. C'est dans cette vue que Frauenhofer a fait avec le même appareil diverses expériences sur l'étincelle électrique, sur la flamme d'une lampe, sur la lumière de Vénus et sur celle de Sirius.

La lumière électrique donne des raies brillantes, au lieu de raies noires; l'une des plus remarquables par sa vive intensité se trouve dans le vert.

La lumière d'une lampe donne pareillement des raies brillantes; on peut surtout en distinguer deux très-intenses vers le rouge et l'orangé. La flamme de l'hydrogène et celle de l'alcool présentent sous ce rapport la même apparence que les flammes de l'huile.

La lumière de Vénus donne les mêmes raies que la lumière du soleil, seulement elles sont moins faciles à distinguer vers les extrémités du spectre.

Enfin, la lumière de Sirius donne aussi des raies noires, mais elles sont tout à fait différentes de celles du soleil ou des planètes. Il y en a trois surtout qui sont très-remarquables : l'une dans le vert, et deux dans le bleu.

D'autres étoiles de première grandeur paraissent donner des raies différentes de celles de Sirius et de celles du soleil.

Ainsi, par cette nouvelle donnée et par ces observations précises, se trouvent établis des caractères distinctifs entre les diverses lumières naturelles ou artificielles; c'est une vaste carrière ouverte par l'habile artiste de Munich dont nous avons à déplorer la perte. Nous pouvons espérer que les physiciens suivront avec un vif intérêt ces premières découvertes qui tiennent de si près à l'origine de la lumière et aux conditions sous lesquelles elle prend naissance, soit artificiellement dans les corps terrestres, soit naturellement dans le soleil et les étoiles.

Déjà plusieurs physiciens ont étudié sous ce rapport les flammes diversement colorées : on sait que certains sels ont la propriété de donner des couleurs plus ou moins vives aux flammes de l'hydrogène, de l'huile ou de l'alcool.

Les sels de chaux donnent un rouge de brique; ceux de strontiane, un cramoisi; ceux de soude, un jaune vif assez pur; ceux de baryte, un vert-pomme; ceux de cuivre, un vert ma-

gnifique ou un bleu verdâtre; ceux de potasse, un bleu violet pâle.

On observe d'abord la flamme dans son état naturel; elle donne en général un spectre discontinu où les couleurs dominantes sont le jaune, le vert de diverses nuances et beaucoup de violet; les raies y sont fort nombreuses. Lorsque ensuite on la colore par un sel, le spectre prend un tout autre aspect pour les couleurs et aussi pour les raies qui changent de caractère; la chaux, par exemple, donne une raie jaune et une raie verte bien marquée, tandis que la strontiane donne une raie bleue excessivement brillante.

D'autres observations très-dignes d'intérêt sont celles qui ont été faites par M. Brewster d'abord, et ensuite par MM. Miller et Daniell sur la propriété que possèdent certaines vapeurs (gaz nitreux, iode, brôme, chlore), de faire naître une foule de raies distinctes dans le spectre d'une flamme, lorsque la lumière traverse ces vapeurs avant de tomber sur le prisme qui doit la décomposer.

100. Indices de réfraction pour divers rayons du spectre. — La recherche des indices de réfraction des divers rayons de lumière est un problème d'une grande importance pour la théorie de l'optique et pour la construction des instruments. L'invariabilité des raies du spectre offre, pour le résoudre, un moyen beaucoup plus exact que ceux qu'on pouvait employer quand on n'avait, pour point de repère, que des nuances de couleurs toujours incertaines. Ainsi, au lieu de déterminer pour chaque substance l'indice de réfraction du rouge, de l'orangé, du jaune, etc., on cherche les indices de réfraction des raies que nous avons précédemment appelées b, c, d, e, f, g, h (Fig. 19). Les expériences se réduisent toujours à observer l'angle d'incidence sur le prisme, l'angle d'émergence et la déviation au moyen du théodolite (Fig. 18); mais on peut aussi simplifier cette recherche en plaçant le prisme comme nous l'avons indiqué, de manière qu'il donne successivement pour chaque rayon la déviation *minimum;* alors cette déviation est la seule donnée dont on ait besoin. La lunette qui reçoit le spectre au sortir du prisme est munie d'un fil micrométrique parallèle aux raies, qui permet de remplir la condition du *minimum* avec le dernier degré d'exactitude.

Voici le tableau de quelques expériences très-exactes faites

Digitized by Google

par Frauenhofer. Nous avons désigné par n_1, n_2, n_3, ... n_7, les indices de réfraction correspondant aux raies b, c, d, e, f, g, h.

Tableau des indices de réfraction des divers rayons du spectre d'après les expériences de Frauenhofer.

SUBSTANCES RÉFRINGENTES.	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7
Flint-glass n° 13....	1,627749	1,629681	1,635036	1,642024	1,648260	1,660285	1,671062
Crown-glass.......	1,525832	1,526849	1,529587	1,533005	1,536052	1,541657	1,546566
Eau.............	1,330935	1,331712	1,333577	1,335851	1,337818	1,341293	1,344177
Eau.............	1,330977	1,331709	1,333577	1,335849	1,337788	1,341261	1,344162
Potasse..........	1,399629	1,400515	1,402805	1,405632	1,408082	1,412579	1,416368
Huile de térébenthine	1,470496	1,471530	1,474434	1,478353	1,481736	1,488198	1,493874
Flint-glass n° 3.....	1,602042	1,603800	1,608494	1,614532	1,620042	1,630772	1,640373
Flint-glass n° 30....	1,623570	1,625477	1,630585	1,637356	1,643466	1,655406	1,666072
Crown-glass n° 13...	1,524312	1,525299	1,527982	1,531372	1,534337	1,579908	1,544684
Crown-glass Litt. M.	1,554774	1,555933	1,559075	1,563150	1,566741	1,583535	1,579470
Flint-glass n° 23 et Prisme de 60°....	1,626596	1,628469	1,633667	1,640495	1,646756	1,658848	1,669686
Flint-glass n° 23 et Prisme de 45°....	1,626564	1,628451	1,633666	1,640544	1,646780	1,658849	1,669680

Plusieurs physiciens ont suivi les méthodes que Frauenhofer avait indiquées pour ce genre de recherches, mais nous donnerons seulement ici, dans le tableau suivant, les résultats qui ont été obtenus par M. l'abbé Dutirou, parce qu'ils se rapportent en grande partie aux divers produits de nos fabriques. Nous savons d'ailleurs que ces expériences ont été faites avec beaucoup de zèle, bien que le mémoire où elles sont discutées laisse sur plusieurs points quelque chose à désirer. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXVII, p. 176 et 510.)

Digitized by Google

Tableau des indices de réfraction d'après les expériences de M. l'abbé Dutirou.

DÉSIGNATION DES VERRES.	DENSITÉ.	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7
Flint lourd, jaune de Guinand, à l'acide borique..............	3,417	1,70492	1,70700	1,71439	1,72339	1,73197	1,74859	1,76369
Flint de Frauenhofer..	2,135	1,63142	1,62722	1,63238	1,63913	1,64536	1,65729	1,66788
Flint de Bontemps. ...	2,011	1,61544	1,61720	1,62222	1,62847	1,63158	1,64573	1,65580
Flint ordin. de Guinand	3,610	1,61440	1,61605	1,62090	1,62730	1,63314	1,64432	1,65421
Flint de Guinand à l'acide borique........	4,322	1,61402	1,61580	1,62055	1,62696	1,63276	1,64389	1,65391
Autre flint. *Id*........	3,559	1,61074	1,61242	1,61715	1,62349	1,62917	1,64008	1,64964
Flint ancien de Guinand (blanc)........	2,622	1,60950	1,61125	1,61598	1,62227	1,62800	1,63913	1,64906
Verre de Guinand à l'acide borique........	2,642	1,53519	1,53617	1,53910	1,54270	1,54584	1,55180	1,55690
Idem...............	2,613	1,53264	1,53337	1,53635	1,54002	1,54324	1,54902	1,55389
Crown ordinaire de Guinand..............	2,184	1,52805	1,52904	1,53173	1,53500	1,53825	1,54387	1,54855
Verre de Venise.	2,713	1,52727	1,52837	1,53089	1,53445	1,53754	1,54327	1,54805
Crown de Guinand à l'acide borique.....	2,362	1,52746	1,52849	1,53110	1,53455	1,53743	1,54304	1,54778
Crown de Dollond	2,484	1,52400	1,52469	1,52773	1,53113	1,53409	1,53927	1,54442
Verre à l'acide borique avec une base nouvelle, de MM. Maes et Clémandot (de Clichy)...	2,835	»	»	1,52072	1,52401	1,52706	1,53251	1,54660
Crown de Bontemps...	2,447	1,51244	1,51338	1,51596	1,51924	1,52216	1,52754	1,53224
Verre de MM. Clemandot et Maës, à l'acide borique avec une base nouvelle............	1,951	1,51220	1,51330	1,51582	1,51900	1,52192	1,52704	1,53137
Autre verre, *Id*.......	1,523	1,51133	1,51216	1,51565	1,51863	1,52142	1,52671	1,53107
Verre de Saint-Gobain.	2,329	1,44600	1,44711	1,44979	1,45290	1,45657	1,46238	1,52073

101. Dispersion, rapports de dispersion dans plusieurs substances, pouvoirs dispersifs. — En observant avec attention les spectres formés par des prismes de diverses substances, on reconnaît bientôt que les diverses couleurs, quoique rangées toujours dans le même ordre, n'occupent pas cependant des longueurs proportionnelles. Ainsi, un prisme de flint, par exemple, donne proportionnellement moins de rouge et plus de violet qu'un prisme de crown, et il y a d'autres substances qui offrent des différences encore plus frappantes. En général, la même couleur est tantôt plus ou moins resserrée, tantôt plus ou moins développée. Ce phénomène se trouve évidemment lié avec les grandeurs des indices de réfraction correspondant à chaque couleur. Si l'on prend la différence de ces indices, pour le violet et le rouge, on aura ce que l'on appelle la *dispersion* de la lumière. Une substance est d'autant plus dispersive que

Digitized by Google

pour elle cette différence est plus grande. Ainsi l'on voit, d'après le tableau précédent de Frauenhofer, que la dispersion de la lumière comprise entre la première et la septième raie se trouve exprimée par les nombres suivants :

Flint n° 13	0,043313	Flint n° 3	0,038331
Crown n° 9	0,020734	Flint n° 30	0,042502
Eau	0,013242	Crown n° 13	0,020372
Eau	0,013185	Crown Litt. M	0,024696
Potasse	0,016739	Flint n° 23, prisme 60°	0,043090
Térébenthine	0,023378	Flint n° 23, prisme 45°	0,043116

L'eau est donc, parmi ces substances, celle qui a la moindre dispersion, et le flint celle qui a la plus grande. C'est ce que l'on peut aisément montrer aux yeux en prenant un prisme d'eau et un prisme de flint dont les angles soient tels, par exemple, que les rayons rouges éprouvent à peu près la même déviation, car on pourra voir alors qu'à la même distance le premier spectre aura beaucoup moins de longueur que le second.

Dans le tableau de M. l'abbé Dutirou, les dispersions sont en général du même ordre, excepté pour le verre de Saint-Gobain qui termine le tableau et qui donnerait $n_7 - n_6 = 0,06835$, c'est-à-dire pour les deux raies voisines une dispersion double des plus grandes dispersions totales ; il est peut-être à craindre que ce ne soit le résultat d'une erreur.

Il n'est pas seulement nécessaire de connaître la dispersion totale de chaque substance, mais il importe encore de connaître la dispersion qu'elle exerce sur les divers rayons. Ainsi, pour les rayons compris entre la première et la deuxième raie, les dispersions du flint n° 13, du crown n° 9, et de l'eau, sont respectivement 0,001932, 0,001017, 0,000777 ; car elles sont les différences des indices de réfraction correspondant aux limites de l'intervalle, c'est-à-dire à la première et à la seconde raie.

Lorsqu'on divise la dispersion partielle ou totale d'une substance par la dispersion *correspondante* d'une autre substance, on a le *rapport des dispersions*. C'est ainsi que le tableau suivant a été déduit du tableau de Frauenhofer.

Digitized by Google

Tableau de dispersion partielle de plusieurs substances prises deux à deux.

SUBSTANCES RÉFRINGENTES.	$\frac{n_2-n_1}{n'_2-n'_1}$	$\frac{n_3-n_2}{n'_3-n'_2}$	$\frac{n_4-n_3}{n'_4-n'_3}$	$\frac{n_5-n_4}{n'_5-n'_4}$	$\frac{n_6-n_5}{n'_6-n'_5}$	$\frac{n_7-n_6}{n'_7-n'_6}$
Flint-glass n° 13 et Eau. . .	2,562	2,871	3,073	3,193	3,460	3,726
Flint-glass n° 13 et Crown-glass n° 9.	1,900	1,956	2,044	2,047	2,145	2,195
Crown-glass n° 9 et Eau. . .	1,349	1,468	1,503	1,560	1,613	1,697
Huile de térébenthine et Eau.	1,371	1,557	1,723	1,732	1,860	1,963
Flint-glass n° 13 et Huile de térébenthine.	1,868	1,844	1,783	1,843	1,861	1,899
Flint-glass n° 13 et Kali. . .	2,181	2,388	2,472	2,545	2,674	2,844
Kali et Eau.	1,175	1,228	1,243	1,254	1,294	1,340
Huile de térébenthine et Kali.	1,167	1,268	1,386	1,381	1,437	1,498
Flint-glass n° 3 et Crown-glass n° 9.	1,729	1,744	1,767	1,808	1,911	1,956
Crown-glass n° 13 et Eau. .	1,309	1,436	1,492	1,518	1,604	1,651
Crown-glass Litt. M. et Eau.	1,537	1,682	1,794	1,839	1,956	2,052
Crown-glass Litt. M. et Crown-glass n° 13.	1,174	1,171	1,202	1,211	1,220	1,243
Flint-glass n° 13 et Crown-glass Litt. M.	1,667	1,704	1,715	1,737	1,770	1,816
Flint-glass n° 3 et Crown-glass Litt. M.	1,517	1,494	1,482	1,534	1,579	1,618
Flint-glass n° 30 et Crown-glass n° 13.	1,932	1,904	1,997	2,061	2,143	2,233
Flint-glass n° 23 et Crown-glass n° 13.	1,904	1,940	2,002	2,107	2,168	2,268

On voit par ce tableau que les rapports des dispersions partielles des diverses substances sont en général très-différents, et qu'en général ils vont en croissant depuis les intervalles des premières raies jusqu'aux intervalles des dernières. Cependant, pour le flint n° 13 et la térébenthine, les rapports sont à peu près les mêmes dans toute la longueur du spectre, et pour le flint n° 3 et le crown litt. *m*, le rapport minimum se trouve compris entre la troisième et la quatrième raie. Il serait très-important de vérifier par l'expérience ce que ces derniers résultats semblent offrir de général.

Le *pouvoir dispersif* d'une substance est le quotient que l'on obtient en divisant sa dispersion par son indice moyen de réfraction diminué de l'unité. On appelle *indice moyen* de réfraction celui qui appartient à la lumière moyenne du spectre ou à la raie *e* ou à l'indice n_4.

102. Achromatisme. — On dit que les prismes sont *achromatiques* quand ils ont la propriété de dévier la lumière sans y

développer de couleurs, et l'on dit pareillement que les lentilles sont achromatiques quand elles forment en leurs foyers des images incolores des objets. On a cru pendant longtemps que l'*achromatisme* était impossible, c'est-à-dire que la lumière ne pouvait pas être déviée sans être décomposée : c'est Newton lui-même qui avait été conduit à cette conséquence, dont l'inexactitude ne fut constatée qu'après bien des années, et par de longs débats entre les plus grands géomètres, tels que Euler, Clairaut et d'Alembert. A la vérité, Hall avait construit dès 1733 de véritables lunettes achromatiques qu'il conservait sans publier son invention, et Jean Dollond avait fait la même découverte en 1757, et l'avait rendue publique ; mais il faut toujours distinguer un fait particulier d'une théorie générale. La découverte de Dollond fut sans doute un grand événement pour l'astronomie ; mais pour lui donner toute son importance, il fallait la développer par le calcul, et déterminer les conditions sans lesquelles la pratique la plus ingénieuse ne pouvait tenter les perfectionnements nécessaires. Présentement, après tous les progrès que l'on a faits, soit en optique, soit dans l'art de travailler les verres, et avec toutes les ressources que le calcul fournit aux physiciens, la question de l'achromatisme est encore l'une des plus délicates et des plus embarrassantes, tant pour la théorie que pour la pratique. Nous devons seulement nous proposer ici de faire comprendre les principes sur lesquels repose la construction des prismes et des lentilles achromatiques.

On démontre par le calcul qu'un rayon de lumière simple éprouve, en traversant un nombre quelconque de prismes, une déviation d qui est exprimée par la formule suivante, si les angles sont assez petits pour se confondre avec leurs sinus :

$$d = (n-1)a + (n'-1)a' + (n''-1)a'', \text{ etc.}$$

a, a', a'', etc., sont les angles réfringents des prismes, et n, n', n'', les indices de réfraction du rayon simple dont il s'agit, dans la substance de chacun des prismes.

Si quelques-uns des prismes ont leurs angles réfringents tournés en sens contraire, les termes correspondants de la formule doivent être pris avec le signe *moins*.

Ainsi, pour le cas de deux prismes, qui est le seul que nous ayons besoin de discuter ici, on aura, suivant que les angles seront tournés dans le même sens ou en sens opposé :

Digitized by Google

$$d = (n - 1)a + (n' - 1)a' \qquad \text{(Fig. 20)},$$

ou

$$d = (n - 1)a - (n' - 1)a' \qquad \text{(Fig. 21)}.$$

Au moyen de cette dernière formule, on peut facilement déterminer quel peut être le rapport des angles réfringents de deux prismes dont la substance est connue, pour que leur ensemble n'imprime aucune déviation à un rayon d'une réfrangibilité donnée; car, la déviation étant nulle, on a :

$$(n - 1)a = (n' - 1)a', \quad \text{d'où} \quad a = a'\left(\frac{n' - 1}{n - 1}\right).$$

Supposons, par exemple, que la substance du prisme g' soit du crown n° 9 (tableau de Frauenhofer, page 207), et le prisme g du flint n° 13 : l'indice de réfraction du premier pour les rayons de la première raie est $n' = 1{,}525832$, et celui du second pour les mêmes rayons est $n = 1{,}627749$; il en résulte

$$a = a' . 0{,}8376\,;$$

c'est-à-dire que l'angle du prisme de flint doit être seulement les 83 ou les 84 centièmes de l'angle du prisme de crown; celui-ci étant par exemple de 25°, le premier doit être de 20° 56′ 28″.

Si l'on voulait que les rayons de la septième raie fussent sans déviation, il faudrait prendre pour n et n' les indices de réfraction correspondant à ces rayons, savoir : $n' = 1{,}546566$, $n = 1{,}671062$, et l'on en déduirait

$$a = a' . 0{,}8145.$$

Par conséquent, pour $a' = 25°$, on aurait $a = 20° 21' 43''$.

Ainsi, en supposant (Fig. 22) un prisme de crown s de 25°, et derrière lui un prisme de flint s' de 20° 21′ 43″, le rayon blanc qui tomberait sur ce système dans la direction li serait décomposé, et sortirait dans une direction telle, que le rayon violet $i'v$ de la septième raie serait parallèle au rayon incident, et le rayon rouge $i'r$ de la première serait incliné vers la base du prisme de crown; puisqu'il ne devient parallèle au rayon incident que pour un prisme de flint de 20° 56′ 28″. Or, si le prisme de flint n'y était pas, on aurait un spectre en $r'v'$ dans lequel v' serait au-dessous de r'. En supposant donc que l'angle du prisme de flint augmente graduellement depuis 0 à 20° 21′ 43″, il doit y avoir un angle pour lequel les rayons de la première et de la septième raie sortent parallèles entre eux, puisqu'en pas-

Digitized by Google

sant de $r'v'$, en rv, ils changent de position relative; cet angle est celui de l'achromatisme.

Après avoir démontré qu'il y a un angle qui donne l'achromatisme, il est facile d'en trouver la valeur; car les déviations d_1 et d_7 des rayons de la première et de la septième raie étant égales entre elles, et étant données par les équations

$$d_1 = (n_1 - 1)\,a - (n'_1 - 1)\,a'; \quad d_7 = (n_7 - 1)\,a - (n'_7 - 1)\,a',$$

on a :

$$(n'_1 - 1)\,a - (n'_1 - 1)\,a' = (n_7 - 1)\,a - (n'_7 - 1)\,a',$$

d'où

$$a = a'\,\frac{n'_7 - n'_1}{n_7 - n_1};$$

et, d'après les valeurs précédentes de n et n' pour la première et la septième raie, il en résulte

$$a = a'.0,4787;$$

et, puisque $a' = 25°$, on a $a = 11°58'3''$.

Ainsi, un système composé d'un prisme de crown n° 9 de 25° et d'un prisme de flint n° 13 de $11°\,58'\,3''$, est un système achromatique que les faisceaux blancs traversent sans que leurs rayons de la première et de la septième raie soient séparés. Cependant ces faisceaux éprouvent une déviation de $5°\,27'\,58''$, comme il est facile de s'en assurer en mettant pour a et a' leurs valeurs, et pour n et n' leurs valeurs n_1 et n'_1 dans l'équation qui donne d_1, ou leurs valeurs n_7 et n'_7 dans celle qui donne d_7.

C'est ainsi que l'on peut, dans tous les cas, déterminer les rapports des angles que doivent avoir deux prismes, pour que deux rayons d'une réfrangibilité connue reprennent leur parallélisme entre eux après les avoir traversés.

Cependant il faut remarquer que l'achromatisme déterminé par ces conditions est d'autant plus incomplet que les rapports des dispersions partielles des deux substances sont plus variables. Si ces rapports étaient les mêmes, les valeurs de a déterminées par l'équation précédente deviendraient les mêmes pour toutes les couleurs, et l'achromatisme serait alors parfait. C'est ce qui arriverait, par exemple, avec des prismes de flint n° 13, et de térébenthine, comme on peut le voir dans le tableau de Frauenhofer. Mais ces rapports étant, en général, variables d'une couleur à l'autre, il en résulte que la valeur

de g, qui convient pour accorder deux couleurs, même les couleurs extrêmes, n'est pas celle qui convient pour accorder les nuances intermédiaires. Dans ce cas, de quelque manière que l'on s'y prenne, l'achromatisme est imparfait; pour y remédier plus complétement, on peut alors y employer trois ou quatre prismes de diverses substances; car il est facile de voir, par la formule générale, que l'on peut faire sortir parallèlement autant de rayons de réfrangibilité différente que l'on emploie de prismes.

L'achromatisme des lentilles se détermine par les mêmes principes. Nous avons vu que la distance focale principale d'une lentille est donnée par la formule :

$$f = \frac{rr'}{(n-1)(r'-r)}.$$

Supposons qu'après avoir fait une lentille convergente de crown, on se propose de déterminer les courbures d'une lentille de flint, par la condition que les rayons de la première et de la septième raie fassent leurs images à la même distance après avoir traversé le système. Admettons, pour plus de simplicité, que la lentille de crown soit bi-convexe, avec ses deux rayons égaux et que la lentille de flint ait aussi le même rayon de courbure du côté où elle touche celle de crown (Fig. 23); il restera à trouver le rayon de courbure de la seconde face de la lentille de flint. Soient f' sa distance focale principale, pour les rayons de la première raie, et p le point où concourraient les rayons parallèles de cette espèce s'ils étaient modifiés seulement par la lentille de crown; il est évident que, par l'effet de la lentille de flint, ils iront converger en un point plus éloigné, par exemple au point m; et réciproquement, si l'on mettait en m un point lumineux, les rayons de la première raie qu'il émettrait se trouveraient dirigés, après avoir traversé la lentille de flint, de manière que leur prolongement passât au point p; on a donc, entre ces deux distances $ap = f$ et $am = b$, la relation

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{b},$$

f_1 étant la distance focale principale de la lentille de crown pour les rayons de la première, et f'_1 celle de la lentille de flint pour les mêmes rayons.

Or, par la condition que nous voulons remplir, la valeur inconnue de b devant être la même pour les rayons de la septième raie et pour ceux de la première, on aura pareillement pour ces derniers :

$$\frac{1}{f_7}=\frac{1}{f'_7}+\frac{1}{b},$$

f_7 et f'_7 désignant les distances focales principales de la lentille de crown et de celle de flint, pour les rayons de la septième raie. Il en résulte :

$$\frac{1}{f_1}-\frac{1}{f_7}=\frac{1}{f'_1}-\frac{1}{f'_7}.$$

D'ailleurs pour la lentille de crown, dont les rayons sont égaux, on a en général :

$$f=\frac{r}{2(n-1)},\quad f_1=\frac{r}{2(n_1-1)}\quad \text{et}\quad f_7=\frac{n}{2(n_7-1)};$$

d'où il résulte

$$\frac{1}{f_1}-\frac{1}{f_7}=\frac{r}{2(n_1-n_7)}.$$

Pour la lentille de flint, dont les rayons r et r' sont inégaux, on a :

$$\frac{1}{f'_1}-\frac{1}{f'_7}=\frac{(r'-r)(n'_1-n'_7)}{rr'};$$

d'où il résulte enfin :

$$r'=\frac{r(n'_7-n'_1)}{n'_7-n'_1-2(n_7-n_1)};$$

et, d'après les valeurs précédentes de n_1, n_7, n'_1, n'_7,

$$r'=23,47r,$$

c'est-à-dire que le rayon r' doit être plus que vingt fois le rayon r.

Si l'on suppose, par exemple, $r=1^{\text{m}}$, on aura : $r'=23^{\text{m}},47$, et la valeur de b, ou la distance focale principale de cette lentille composée, devient alors facile à calculer; on trouve $b=2^{\text{m}},22$.

Mais la coïncidence des rayons extrêmes ne détermine pas

Digitized by Google

celle des rayons intermédiaires, et pour que l'achromatisme soit parfait, il faut pour les lentilles, comme pour les prismes, que les dispersions partielles conservent entre elles le même rapport dans toute la longueur du spectre. Au reste, le calcul des objectifs des lunettes présente une difficulté de plus, dans le détail de laquelle nous ne pouvons entrer ici; c'est le compte que l'on doit tenir de l'aberration de sphéricité.

CHAPITRE V.

De la Vision et des Instruments d'optique.

103. Structure de l'œil. — La forme extérieure de l'œil est à peu près celle de deux segments sphériques de différents rayons, réunis par leur base (Pl. 34, Fig. 24); le plus petit est celui qui offre au dehors la partie diaphane et saillante de l'œil. Cette forme régulière est maintenue par une membrane épaisse et fibreuse, d'un tissu très-ferme, que l'on nomme la *sclérotique*, lorsqu'on la considère dans son ensemble comme enveloppe externe de l'organe; mais on la nomme *cornée transparente* dans la partie antérieure et diaphane, et *cornée opaque* dans les parties qui forment le blanc de l'œil, et dans toute la partie postérieure b'. Aux points s et s', où la cornée opaque devient transparente, se trouve tendue, dans l'intérieur de l'œil, la membrane colorée de l'*iris*, ayant, comme on sait, la forme d'un plan circulaire, dont l'intérieur est percé d'un trou rond plus ou moins ouvert, et parfaitement noir, que l'on nomme la *pupille*. Derrière l'iris se trouve suspendu le *cristallin* cc'; il est enfermé dans une membrane particulière que l'on nomme la *capsule cristalline*, et qui va s'attacher à la cornée par tous les points de son contour. Cette capsule forme une cloison continue qui sépare l'œil en deux parties ou en deux *chambres;* le liquide qui remplit la *première chambre* ou la chambre antérieure se nomme l'*humeur aqueuse*, et celui qui remplit la *seconde chambre* se nomme *humeur vitrée*. Ces liquides sont contenus dans des membranes particulières; celle de l'humeur vitrée se nomme *hyaloïde*.

Entre l'hyaloïde et la sclérotique, se trouvent encore deux autres membranes, la choroïde et la rétine, qui jouent dans l'acte de la vision le rôle le plus important.

La *choroïde* est une membrane vasculaire qui revêt toute la face interne de la sclérotique, depuis le fond de l'œil jusqu'à la capsule cristalline; il y a même quelques anatomistes qui pré-

Digitized by Google

tendent qu'elle se prolonge en avant pour venir former l'iris, en se repliant sur elle-même.

La *rétine* n'est autre chose que l'épanouissement du nerf optique; elle est simplement posée sur la choroïde, et s'en détache avec la plus grande facilité lorsque l'on coupe l'œil pour en faire l'anatomie. Cette membrane, ou plutôt ce lacis nerveux, offre une transparence presque complète.

Telle est à peu près la disposition générale des principales pièces qui composent l'organe de la vue. Les dimensions moyennes d'un œil humain sont ainsi qu'il suit :

Rayon de courbure de la sclérotique.	10 à 11	millimètres.
» de la cornée transpar..	7 à 8	»
Diamètre de l'iris.	11 à 12	»
» de la pupille.	3 à 7	»
Épaisseur de la cornée transparente.	1	»
Distance de la pupille à la cornée.	2	»
» » au cristallin.	1	»
Rayon antérieur du cristallin.	7 à 10	»
» postérieur du cristallin.	5 à 6	»
Diamètre du cristallin.	10	»
Épaisseur.	5	»
Longueur de l'axe de l'œil.	22 à 24	»

Nous allons examiner maintenant, d'après ces données, les modifications qu'éprouve la lumière en traversant les divers milieux qui composent l'œil.

Lorsqu'un point lumineux est placé à 25 ou 30 centimètres au-devant de l'œil sur l'axe du cristallin, une partie du faisceau qu'il envoie tombe sur le blanc de l'œil, et se trouve irrégulièrement réfléchie dans tous les sens; une partie plus centrale tombe sur la cornée transparente, pénètre dans l'humeur aqueuse en se réfractant, et ses bords extérieurs viennent éclairer le contour de l'iris, tandis que la partie tout à fait centrale passe par l'ouverture de la pupille au milieu de l'humeur aqueuse, traverse le cristallin, l'humeur vitrée, la rétine elle-même, et va tomber sur la choroïde. La lumière que reçoit l'iris est irrégulièrement réfléchie dans tous les sens, et va reporter au dehors la forme et la couleur de cette membrane. Le faisceau central qui traverse la pupille se trouve réfracté par le cristallin, comme il le serait par une lentille convergente, car le cristallin est plus

réfringent que l'humeur aqueuse, et plus aussi que l'humeur vitrée; par conséquent, sous certaines conditions, ce faisceau devenu convergent, doit former quelque part une image du point lumineux d'où il est émané. Supposons pour un moment qu'il forme cette image exactement sur la rétine ou sur la choroïde en m : alors, il est évident qu'un autre point lumineux l' fera une image pareille en m', et qu'ainsi on aura au fond de l'œil une petite image mm' de l'objet ll'; cette image sera renversée, et présentera d'ailleurs toutes les nuances, tous les accidents de lumière et tous les contours de l'objet lui-même.

C'est ce que l'on peut vérifier par l'expérience, en fermant le trou du volet d'une chambre noire par un œil de bœuf ou de mouton fraîchement préparé, et aminci à sa partie postérieure au point d'offrir une enveloppe translucide; l'observateur, placé dans la chambre noire, voit alors assez distinctement, sur le fond de l'œil soumis à l'expérience, l'image de la flamme d'une bougie ou d'un corps vivement éclairé.

Ainsi, considéré d'une manière générale, le phénomène physique de la vision paraît être un résultat très-simple des lois de la réfraction et du pouvoir des lentilles; mais, lorsqu'on examine de plus près toutes les circonstances qui accompagnent la formation des images, on rencontre des difficultés dont jusqu'à présent la science n'a pu rendre compte d'une manière satisfaisante. Parmi ces difficultés, les plus remarquables sont les deux suivantes :

1° L'œil est achromatique, car les objets ne nous paraissent jamais environnés d'auréoles colorées.

2° La netteté des images semble être indépendante de la distance des objets; car nous voyons nettement encore à quelques mètres, à 100 mètres, à quelques lieues même, et jusqu'à plusieurs millions de lieues : l'image d'une étoile est aussi nette que celle d'une étincelle que nous avons sous les yeux.

Pour résoudre la première difficulté, il faudrait connaître exactement les indices de réfraction, les puissances dispersives, et les courbures de tous les milieux que la lumière traverse depuis la cornée jusqu'à la rétine; question d'autant plus compliquée et plus difficile, que les diverses parties du cristallin ont des réfractions et des puissances dispersives différentes. Cependant sur ce point, on peut consulter avec intérêt les Mémoires de M. Chossat. (*Ann. de Chim. et de Phys.*)

Digitized by Google

Pour résoudre la seconde, on a eu recours à diverses hypothèses dont il est utile d'indiquer au moins la substance.

104. Hypothèses par lesquelles on a essayé d'expliquer comment l'œil s'accommode aux distances. — Pour démontrer d'abord que l'œil s'accommode aux distances, il suffit d'indiquer l'expérience suivante :

Sur un verre mince et transparent, on fait une petite tache, et on la présente devant l'œil à 20, 25 ou 30 centimètres de distance ; alors, lorsqu'on regarde cette tache, on ne voit qu'une image confuse des objets qui sont au delà du verre ; et réciproquement, lorsque, sans déranger l'œil, on regarde ces objets plus éloignés, on ne voit plus qu'une image confuse de la tache. Donc les objets qui sont à 25 ou 30 centimètres et ceux qui sont plus loin ne forment pas leurs images en même temps et avec la même netteté sur le fond de l'œil, car on les verrait à la fois distinctement et sans confusion. Par conséquent l'œil s'accommode par un acte de la volonté, tantôt pour voir près, tantôt pour voir loin : et en effet, on a le sentiment d'une modification différente pour chacune des distances auxquelles on regarde. Pour expliquer cette propriété, on a fait une foule d'hypothèses : les uns admettent que l'œil entier s'allonge ou se raccourcit ; les autres que c'est seulement la cornée transparente qui devient plus ou moins convexe ; d'autres supposent que c'est le cristallin qui agit, soit en se contractant, soit en se déplaçant. Mais il paraît bien certain que l'œil ne s'allonge pas et que la cornée ne change pas de courbure ; pour le cristallin, sa contraction est très-improbable et son déplacement impossible.

En m'occupant de quelques recherches sur ce sujet, j'ai été conduit à une remarque qui me semble importante. La dissection d'un grand nombre de cristallins m'a fait voir que ce corps n'est pas composé de couches concentriques comme on le suppose, mais de couches inégales en courbure et en épaisseur, comme on le voit dans les figures 25 et 26. Cette dernière figure représente un cristallin dans lequel une des moitiés seulement était disséquée. Il en résulte que les couches centrales étant tout à la fois plus courbes et plus réfringentes que celles des bords, les rayons qui traversent ces dernières ne peuvent pas converger au même point que ceux qui ont traversé les premières. Le faisceau central *cc'* converge plus près, et le faisceau des bords *bb'* va converger plus loin. Ainsi le cristallin n'est pas une lentille à

Digitized by Google

un seul foyer, mais une lentille à un nombre infini de foyers différents. Ce fait me semble constant; sans essayer ici de le développer dans tous ses détails, j'essayerai d'indiquer comment il peut concourir à l'explication des phénomènes. D'abord, si l'on place au-devant de l'œil une lame opaque percée d'un trou dont le diamètre soit moindre de 1 millimètre, on distingue nettement tous les objets jusqu'à des distances beaucoup plus petites qu'on ne le pourrait faire sans cette précaution; c'est qu'alors le faisceau qui pénètre dans l'œil est si mince qu'il est à peine nécessaire qu'il soit aminci davantage par la convergence pour faire des images nettes. Aussi n'observe-t-on aucune différence lorsque le petit trou coïncide avec le bord ou avec le centre de la pupille. Avec un faisceau mince on peut donc voir nettement à toutes les distances et par toutes les zones du cristallin.

Quand on veut regarder à la vue simple et sans diaphragme un objet de plus en plus rapproché, on rétrécit de plus en plus l'ouverture de la pupille; c'est un fait facile à vérifier. Le but de ce rétrécissement est en effet d'arrêter les rayons qui tomberaient trop loin du centre du cristallin, et dont la convergence ne pourrait avoir lieu qu'au delà de la rétine.

Quand on veut regarder au loin, on ouvre au contraire la pupille autant qu'il est possible, afin que le faisceau incident soit large, et que ses bords extérieurs tombent près des bords du cristallin, pour converger ensuite sur la rétine. Alors, il est vrai, la partie centrale du faisceau converge trop tôt; mais l'épanouissement qu'elle peut prendre en allant depuis son point de convergence jusqu'à la rétine est toujours très-petit, et peut d'autant moins troubler la vision que l'éclat de sa lumière est toujours très-faible par rapport à l'éclat de la lumière des bords.

105. Jugement sur la couleur, la forme, la situation et la grandeur des objets. — Nous distinguons les *couleurs* comme nous distinguons les sons, sans le secours du toucher; mais nous ne les distinguons pas de prime abord sans exercice ni sans comparaison. Il faut des expériences souvent répétées pour reconnaître que le rouge, le jaune et le bleu, par exemple, ne font pas la même impression sur nous; comme il faut des expériences souvent répétées pour reconnaître une différence entre les sons graves et les sons aigus. Nous voyons la lumière avant de savoir démêler les couleurs, comme nous entendons

Digitized by Google

du bruit avant de savoir démêler les sons. Ce résultat, qui semble bien naturel, se trouve confirmé par les observations que l'on a faites sur les aveugles de naissance auxquels on est parvenu à rendre la vue dans un âge plus ou moins avancé.

Les images tracées sur la rétine sont, pour la couleur, le contour et la forme, une représentation fidèle des objets; il suffit donc, pour que nous puissions prendre *directement* une idée de la forme des corps, que nous puissions distinguer les points de la rétine qui sont en repos et ceux qui sont affectés ou ébranlés par la lumière. Or, il n'y a pas un des points de notre enveloppe extérieure sur lequel cette distinction ne soit facile. Une piqûre au bras se distingue d'une piqûre au doigt, et nous pourrions sans doute, avec le bras comme avec la paume de la main, saisir la différence qu'il y a entre un cercle et un carré. Par conséquent, il n'y a pas de raison pour que cette différence ne puisse être saisie avec plus de netteté encore, et plus de précision, sur la membrane de la rétine. Les objets donnent au fond de l'œil des *images renversées*, et de là on a voulu conclure que naturellement nous devons voir les *objets renversés*. Cette conclusion serait légitime si l'on supposait que l'âme *regarde* les images, et qu'elle est placée derrière l'œil, comme une personne derrière le tableau d'une chambre noire. Mais, si l'on suppose que l'âme ne regarde pas les images, qu'elle les sent, et qu'elle s'élève de la sensation à la cause qui la produit, il est évident que l'existence extérieure des corps et leur situation résultent pour nous d'un seul et même jugement. Il paraît toutefois que le sens de la vue seul ne pourrait pas plus nous conduire à la connaissance du monde extérieur que le sens de l'ouïe; tout semble indiquer que sur ce point le sens du toucher nous fournit des données indispensables et qu'il ne peut être suppléé par aucun autre sens.

L'extériorité des objets une fois constatée, leur *distance* peut être appréciée de plusieurs manières. 1° Le cône lumineux qui tombe sur la pupille est d'autant plus divergent que le point qui l'envoie est plus rapproché de l'œil, et d'après ce que nous avons vu, il faut que l'œil s'ajuste à ces diverses distances, pour faire tomber sur la rétine une image suffisamment nette. La conscience que nous avons de cet ajustement ou de cette modification de l'œil devient, par l'habitude, la donnée d'après laquelle nous portons notre jugement sur la distance. De plus,

Digitized by Google

lorsque nous regardons avec les deux yeux, nous devons donner à leur axe optique une inclinaison relative d'autant plus grande que l'objet est plus rapproché; nous avons pareillement conscience de cette inclinaison; c'est une seconde indication qui vient au secours de la première, et qui donne en général beaucoup plus de justesse à nos jugements; car il est facile de se tromper quand on juge avec un œil, à moins de s'y être exercé.

On appelle *distance de la vision distincte* la distance à laquelle nous voyons nettement et sans effort divers objets, tels, par exemple, qu'une page imprimée en caractères ordinaires.

Cette distance est d'environ 25 ou 30 centimètres pour les vues moyennes; elle s'étend à près de 1 mètre pour les vues presbytes, et se réduit à quelques centimètres pour les myopes. Au reste, elle varie avec les dimensions des objets; des lettres très-fines, par exemple, et des lettres de moyenne grandeur ne peuvent être distinguées à la même distance.

Lorsque les objets sont assez éloignés pour qu'en les regardant les axes optiques des deux yeux deviennent sensiblement parallèles, nous n'avons plus de règle sûre pour déterminer leur distance. Alors, nous avons recours à des considérations plus ou moins trompeuses : nous tenons compte de l'éclat de la lumière, de la netteté avec laquelle nous distinguons les détails, de la grandeur des objets eux-mêmes, si elle nous est connue d'avance, etc. Par ces divers moyens, habilement combinés, quelques observateurs parviennent à une étonnante précision dans leurs jugements : mais, s'ils changent de lieu ou de climat, leur science est à chaque instant déroutée par un autre aspect du ciel, un air plus pur ou plus brumeux, ou par des objets d'une forme nouvelle.

Le jugement de la *grandeur* est, en général, une conséquence du jugement de la distance. L'image d'un vaisseau peut être au fond de l'œil d'un observateur beaucoup plus petite que celle d'une barque, et cependant l'observateur ne s'y trompera pas; il dira que le vaisseau est plus grand que la barque, parce qu'il pourra juger que sa distance est beaucoup plus grande. Cependant, quand nous savons d'avance la grandeur d'un objet, nous pouvons nous en servir pour estimer sa distance : c'est ainsi, par exemple, que la hauteur d'une tour est mieux appréciée quand on voit sur son sommet des hommes ou des objets d'une gran-

Digitized by Google

deur connue; mais, si ces homme étaient des nains, l'œil ne s'y laisserait pas prendre, il trouverait sans doute dans les modifications de la lumière des moyens de se défendre de l'illusion.

106. Vision avec les deux yeux ou vision binoculaire. — Stéréoscope; pseudoscope.—Quand nous regardons un tableau avec les deux yeux, nous donnons aux figures qui le composent une position déterminée par rapport à nous, et, comme cette position est exactement la même, soit que nous regardions avec l'un des deux yeux ou avec l'autre, il est impossible que le tableau nous paraisse double quand nous le voyons avec les deux yeux ensemble. Il n'en est plus de même lorsque nous regardons un objet qui se projette sur un second plan un peu plus reculé : cet objet cache à l'un des yeux une partie du second plan, et à l'autre une autre partie; par conséquent, avec les deux yeux, on est embarrassé de savoir en quelle partie du plan il doit tomber. Mais il n'arrive presque jamais que les deux yeux aient une égale force, ou plutôt il y en a toujours un qui l'emporte et auquel nous prêtons une plus forte attention : c'est d'après les impressions de celui-là que nous décidons.

Pour juger qu'un objet vu par les deux yeux est vu plus éclatant que s'il était vu par un seul, il suffit de regarder une bande de papier blanc avec l'un des yeux, et de placer devant l'autre un obstacle qui nous en cache la moitié : la partie qui est vue par les deux yeux à la fois paraît beaucoup plus éclairée que celle qui n'est vue que par un seul.

Enfin, quand nous regardons un relief, un cylindre vertical, par exemple, placé dans les limites de la vision distincte, la portion de sa surface visible pour l'œil droit n'est pas la même que celle qui est visible pour l'œil gauche; car on peut considérer les centres des deux pupilles comme deux points extérieurs par lesquels on mène des tangentes au cercle qui forme la section du cylindre dans le plan horizontal de la vision; les tangentes menées par l'œil droit embrassent bien en grandeur le même arc que les tangentes menées par l'œil gauche, mais ces arcs sont autrement placés sur la circonférence. En supposant que la distance des yeux soit de 8 centimètres, et la distance du cylindre de 80 centimètres, les axes visuels de l'œil droit et de l'œil gauche font entre eux un angle d'environ 6°; par conséquent, l'œil droit découvre 6° de plus de la surface latérale de

Digitized by Google

droite du cylindre et l'œil gauche 6° de plus de la surface de gauche. Si le cylindre était à une distance double cette différence se réduirait à moitié, et s'il se trouve seulement à 7 ou 8 mètres elle devient insensible; si le cylindre était horizontal ou parallèle à la ligne des yeux, il n'y aurait plus aucune différence de cette nature à aucune distance. Admettons maintenant que l'on regarde un objet plus varié dans ses formes, un buste, une statue, un bas-relief, où la lumière donne des clairs et des ombres, on comprend que les images des deux yeux cessent d'avoir une identité parfaite : l'une appartient à un certain point de vue, l'autre à un point de vue de même distance, mais d'une position angulaire un peu différente, de 2, 3, 4, 5 ou 6° suivant l'éloignement de l'objet. Ces deux images dissemblables concourent cependant à la sensation unique que nous éprouvons, et servent peut-être à nous faire mieux apprécier le relief; je dis peut-être parce qu'un cylindre horizontal ne nous paraît pas moins en relief qu'un cylindre vertical; parce que nous saisissons parfaitement des reliefs éloignés de plus de 7 ou 8 mètres, pour lesquels les images des deux yeux ne présentent plus d'une manière perceptible le caractère différentiel dont nous venons de parler; enfin, parce qu'un œil seul ne confond pas les formes modelées avec les formes plates.

Toutefois, il y a quelque intérêt physiologique à faire l'analyse des impressions diverses que nous pouvons recevoir par le concours simultané de deux images dissemblables, occupant des points homologues de la rétine, l'une dans l'œil droit, l'autre dans l'œil gauche.

La dissimilitude peut être telle que les deux images restent distinctes; c'est ce qui arrive, par exemple, quand on regarde un objet éloigné, un arbre ou une maison, avec les deux yeux, l'un agissant par vision directe, l'autre au moyen d'une lunette. Alors, l'image naturelle ne se confond pas avec l'image grossie; il y a seulement dans la partie superposée quelque confusion pour les formes et pour les couleurs. C'est, comme on sait, un procédé dont beaucoup de personnes se servent avec succès pour apprécier le grossissement d'une lunette; il suffit de juger, en effet, combien de fois la dimension de l'image naturelle est contenue dans la dimension homologue de l'image grossie.

La dissimilitude peut être telle qu'elle donne cependant une résultante unique; c'est M. Wheatstone qui a le premier fait

Digitized by Google

l'analyse de ce second cas, et il l'a faite avec son habileté ordinaire. Il a été ainsi conduit au problème suivant : Étant données, à côté l'une de l'autre, deux perspectives d'un objet peu éloigné, prises à la même distance, mais l'une avec l'œil droit, l'autre avec l'œil gauche, composer un instrument qui superpose les images de ces deux figures, quand elles sont regardées chacune avec un œil; c'est-à-dire, qui fasse paraître au même lieu et dans le même espace celle qui est regardée avec l'œil droit et celle qui est regardée avec l'œil gauche. Il suffit évidemment de dévier d'une manière convenable les rayons que chaque figure envoie à l'œil qui la regarde, ou seulement de dévier les rayons qui arrivent à l'un des yeux, afin qu'ils prennent en y entrant la même direction que s'ils venaient de la figure que l'autre œil regarde. C'est donc par la réflexion sur des miroirs plans, ou par la réfraction dans des prismes d'un très-petit angle que le problème peut être résolu, et l'on voit de suite qu'il peut recevoir plusieurs solutions.

L'instrument qui remplit les conditions indiquées, soit par réflexion, soit par réfraction, est appelé, tantôt *stéréoscope*, tantôt *pseudoscope;* double dénomination qui ne tient pas à une différence intrinsèque de l'instrument lui-même, mais seulement à la manière dont les figures ou perspectives lui sont présentées.

On l'appelle *stéréoscope*, quand les perspectives sont disposées pour que chaque œil regarde celle qui lui appartient.

On l'appelle *pseudoscope*, quand les perspectives sont disposées pour que chaque œil regarde celle qui appartient à l'autre.

M. Wheatstone avait d'abord insisté sur le stéréoscope par réflexion; M. Brewster a fait connaître les avantages du stéréoscope par réfraction, et les amateurs de curiosités optiques semblent lui donner la préférence. Le principe de sa construction est indiqué (PL. 36, FIG. 3). a et α représentent l'œil droit et l'œil gauche, lmn est la figure que doit regarder a, $\lambda\mu\nu$ celle que doit regarder α; les raisonnements que nous allons faire s'appliquent aux sections de ces figures, cependant pour montrer leur différence il m'a paru nécessaire de les rabattre chacune au-devant de sa section, la première en p, la seconde en ϖ; c'est une pyramide tronquée à base carrée vue d'en haut, p est la perspective qui appartient à l'œil droit, puisque la base supérieure est projetée à gauche sur la base inférieure, ϖ est celle

Digitized by Google

qui appartient à l'œil gauche par une raison contraire. Au-devant de chacun des yeux se trouve un prisme n'ayant qu'un très-petit angle réfringent, celui de l'œil droit doit dévier l'image de *lmn* et la faire paraître en *l'm'n'*, celui de l'œil gauche doit dévier l'image de $\lambda\mu\nu$ et la faire en $\lambda'\mu'\nu'$, exactement sur la précédente. C'est ainsi que l'on arrive à superposer deux images dissemblables, de telle sorte qu'en définitive elles se trouvent placées d'une manière homologue, l'une dans l'œil droit, l'autre dans l'œil gauche.

La question qui se présente maintenant est celle de savoir si elles resteront distinctes, ou si elles donneront une résultante unique. Or, il arrive, et c'est là l'observation fondamentale de M. Wheatstone, il arrive qu'elles ne restent pas distinctes ; cependant elles ne peuvent pas se confondre puisqu'elles sont différentes, elles se combinent donc entre elles, ou plutôt notre faculté de voir les combine pour en faire sortir une sensation unique qui est celle du relief, dont les figures sont des perspectives différentes. Cette superposition artificielle a donc le même effet que la superposition naturelle, parce qu'elle va peindre, sur les parties homologues des deux rétines, deux images dont la dissimilitude est exactement conforme à celle qui résulte de la vision naturelle d'un relief placé à petite distance.

Le stéréoscope devient pseudoscope, comme nous l'avons dit, quand on présente à l'œil droit la perspective qui appartient à l'œil gauche et *vice versâ;* la sensation résultante est alors celle d'une pyramide creuse. Cette dénomination n'est peut-être pas heureusement choisie, puisqu'en réalité les perspectives planes que l'on présente aux deux yeux n'appartiennent pas moins au creux qu'au relief.

M. Duboscq, qui construit ces appareils avec beaucoup d'habileté et de goût, obtient aussi la superposition des images par réflexion totale sur les hypoténuses de deux triangles rectangles ; cette disposition a comme la précédente l'avantage de faire voir avec un éclairage uniforme des perspectives transparentes obtenues par la photographie. La chambre noire photographique donne un moyen bien simple d'obtenir les deux perspectives, puisqu'il suffit, en présence du même objet, de lui donner successivement les deux positions qu'auraient les deux yeux en le regardant.

Quand la déviation est opérée par réflexion il y a renversement, par conséquent il faut présenter à l'œil droit l'image qui

Digitized by Google

appartient à l'œil gauche et *vice versâ;* de plus pour se rendre compte de l'ordre de superposition et des grandeurs relatives des diverses parties de l'image, il faut en tracer l'épure, les figures qu'on en donne sont très-incorrectes.

107. Persistance des images et couleurs accidentelles. — De ce qu'un charbon ardent nous fait voir un cercle de feu lorsqu'on le tourne en rond avec assez de rapidité, il en résulte évidemment que les impressions de la rétine persistent après que la cause a cessé d'agir. Il est facile de constater que la durée de cette persistance dépend de l'éclat de la lumière et de la sensibilité de l'organe. Ce principe explique une foule d'illusions, par exemple celles du *thaumatrope*, du *phénakisticope*, du *fantascope*, etc., et celles que l'on produit en faisant tourner dans le même sens ou en sens contraire, et l'une devant l'autre, deux roues concentriques ou excentriques, ayant chacune un certain nombre de rayons, sombres ou brillants. M. Plateau a fait à cet égard des recherches très-ingénieuses (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. LIII et LVIII).

Il faut pareillement que l'action de la lumière se fasse sentir sur la rétine pendant un certain temps pour que l'impression puisse être perçue. Cette durée dépend surtout de l'éclat de la lumière : c'est pour cela que nous distinguons une étincelle électrique ou un éclair, bien que leur lumière soit presque instantanée; tandis que nous ne distinguons pas une balle, un boulet de canon, ou d'autres corps animés d'une moindre vitesse, parce que leur lumière a peu d'intensité.

Quand les corps cessent de nous apparaître avec leurs *couleurs naturelles*, on dit alors qu'ils prennent des *couleurs accidentelles*. On distingue à cet égard les couleurs accidentelles *passagères* et les couleurs accidentelles *permanentes*. 1° Quand, après avoir regardé le soleil pendant quelques instants, on ferme les yeux, l'image prend *diverses couleurs* pendant sa persistance ; quand, après avoir regardé un corps vivement coloré, on porte subitement les yeux sur un corps d'une autre couleur, on éprouve une sensation complexe, qui se compose de l'image actuelle du second corps et de l'image persistante du premier; ainsi le second corps n'est pas vu avec sa couleur naturelle. Ces deux exemples suffisent pour donner une idée des couleurs accidentelles passagères, sur lesquelles on a fait plusieurs théories dont aucune ne nous paraît satisfaisante. 2° Quand un corps coloré

Digitized by Google

est sur un fond noir, il apparaît avec sa couleur naturelle; quand, sur le même fond noir, on vient mettre près de lui un second corps de couleur différente, ces deux corps s'influencent *mutuellement* : leurs couleurs, ou plutôt leurs nuances, sont changées, et ce changement paraît indépendant de la persistance des images, car il subsiste aussi longtemps que les corps sont juxtaposés. M. Chevreul a fait une étude particulière de ces phénomènes, et il les a soumis à des lois remarquables (*Mém. de l'Acad. des sciences*, 1833).

108. Accidents de la vue. — Les *presbytes* ont la vue *trop longue*, ils sont obligés de placer à 50 ou 60 centimètres de distance un papier qu'ils veulent lire; plus près, toutes les images sont confuses. Cette espèce d'infirmité, qui vient d'ordinaire avec l'âge, résulte évidemment d'un défaut de convergence dans les faisceaux qui traversent les humeurs de l'œil; et l'on suppose, en général, qu'elle tient à un aplatissement de la cornée ou du cristallin. Tous les presbytes ont ordinairement la pupille très-peu ouverte, comme s'ils faisaient un effort continuel pour se servir du centre du cristallin, plutôt que des bords, qui ont en effet, comme nous l'avons vu, une distance focale encore plus grande.

Les *myopes* ont la vue *trop courte;* pour voir nettement les objets, ils sont obligés de les approcher à la distance de quelques centimètres; tout ce qui se trouve au delà est pour eux enveloppé d'un nuage, et ne forme au fond de l'œil que des images confuses. Cet accident est opposé au presbytisme, et il résulte en effet d'une cause contraire : les faisceaux qui traversent l'œil d'un myope éprouvent une trop rapide convergence; ils se croisent avant de tomber sur la rétine. On suppose, en général, que les myopes ont la cornée ou le cristallin trop convexe; on remarque aussi que leur pupille est toujours très-dilatée, comme s'ils essayaient de se servir des bords du cristallin plutôt que des parties centrales, qui ont une distance focale principale encore plus désavantageuse pour eux parce qu'elle est plus petite.

De quelque manière que s'accomplisse la vision distincte, soit qu'elle se fasse à la distance moyenne de 20 ou 25 centimètres comme dans les bonnes vues, soit qu'elle se fasse à 50 ou 60 centimètres comme chez les presbytes, ou à quelques centimètres seulement comme chez les myopes, il arrive toujours que, pour voir avec la plus grande netteté, il est nécessaire de tourner

Digitized by Google

l'œil convenablement, de telle sorte que l'image tombe sur un certain point de la rétine et non pas sur un point quelconque. Le point, ou plutôt le petit espace sur lequel on amène les images pour voir le mieux possible, se nomme le *point sensible* de la rétine; il est placé en général près de l'axe de l'œil.

Il y a aussi au fond de l'œil un point que l'on appelle le *point insensible* ou *punctum cæcum*, c'est le petit espace circulaire occupé par l'extrémité du nerf optique, et d'où partent tous les filaments nerveux qui s'entrelacent de mille manières pour former la rétine. La lumière qui tombe sur cet espace ne donne pas plus d'impression que si elle tombait sur un nerf quelconque mis à découvert; et, comme on ne distingue pas la lumière par les nerfs de l'ouïe, du goût ou de l'odorat, non plus que par les nerfs des bras ou des jambes, on ne distingue pas la lumière par le nerf optique avant qu'il soit épanoui en réseau et étalé sur la choroïde. Ce fait remarquable semble bien indiquer encore que la rétine sent les images sur la choroïde, comme la main sent les formes, les contours et les divers degrés de poli des corps qu'elle touche.

On reconnaît l'existence et la position du point insensible de la rétine par l'expérience suivante (Pl. 34, Fig. 27). Sur un fond noir et horizontal *nn'* on place deux petits disques blancs ou deux petites boules, dont les centres sont à environ un décimètre l'un de l'autre; ensuite, on regarde d'en haut à la distance de 25 à 30 centimètres, et dans une position telle que l'œil droit soit verticalement au-dessus du disque de gauche, et que la ligne des deux yeux soit parallèle à la ligne des disques; ces deux conditions étant remplies, on ferme l'œil gauche, et l'on regarde le disque de gauche avec l'œil droit, en l'éloignant ou en l'approchant un peu, mais toujours dans la même verticale; alors on trouve une position où le disque de droite est complétement invisible : plus près ou plus loin il reparaît à l'instant, et jamais on ne cesse de le voir si la ligne des deux yeux est seulement un peu oblique par rapport à celle des disques.

Le docteur Wollaston a observé sur lui-même un phénomène de vision extrêmement remarquable. Un jour, après un violent exercice de deux ou trois heures, il reconnut soudainement qu'il ne pouvait plus distinguer que *la moitié* des objets : en regardant, par exemple, un homme en face, il ne voyait que la moitié de sa figure et la moitié de son corps, etc. Ce phéno-

Digitized by Google

mène de *semi-vision* dura un quart d'heure environ; il avait lieu pour un œil comme pour l'autre, ou pour les deux ensemble; c'était la moitié gauche des objets qui était invisible, c'était par conséquent la moitié droite de chacun des yeux qui était insensible.

Vingt ans plus tard, le même accident se renouvela, mais en sens inverse; cette fois, c'était la moitié droite des objets qui était invisible. (Voy. l'explication physiologique qu'il en donne, *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXVII, p. 102.)

109. Besicles. — Les besicles sont des lunettes dont se servent les presbytes et les myopes pour avoir une vision distincte des objets à la distance moyenne de 25 ou 30 centimètres.

Supposons, par exemple, qu'un presbyte ne puisse voir nettement qu'à la distance de 90 centimètres : alors, il est évident que pour lui les images ne peuvent être nettes, à moins que la lumière ne pénètre dans ses yeux avec la divergence qu'elle a en venant de 90 centimètres de distance; ainsi, pour qu'il puisse voir, comme une personne douée d'une bonne vue, les objets à 30 centimètres, il suffit de placer les objets à cette distance et de modifier par une lentille la lumière qu'ils envoient, pour qu'elle ne soit pas plus divergente que si elle venait de 90 centimètres. Par conséquent, la distance b de l'objet à la lentille étant de 30 centimètres, la distance m de l'image virtuelle devra être de 90 centimètres, on aura donc :

$$\frac{1}{30}-\frac{1}{90}=\frac{1}{f};$$

d'où

$$f=+45;$$

c'est-à-dire qu'un presbyte, qui voit naturellement à 90 centimètres, doit employer immédiatement au-devant de l'œil un verre convergent de 45 centimètres de distance focale principale pour voir les objets à 30 centimètres.

En général, si d représente la distance de la vision distincte, la distance focale principale f de la lentille convergente ou divergente dont il faut faire usage pour voir à 30 centimètres, sera donnée par cette formule :

$$f=\frac{30d}{d-30}.$$

Si $d>30$, f est positif, l'œil est presbyte, il lui faut un verre convergent; si $d<30$, f est négatif, l'œil est myope, il lui faut

Digitized by Google

un verre divergent : dans tous les cas, il suffit de connaître d pour en déduire f, et par conséquent la force des lunettes qu'il convient d'employer.

Les lunettes du myope lui servent pour voir de près et de loin; cependant le défaut de sa vue n'est pas également bien corrigé dans les deux cas. En effet, l'œil très-myope, dont la vision distincte est à 5 centimètres, doit porter des verres divergents dont la distance focale principale soit de 6 centimètres, qui sont presque ceux qu'il lui faudrait pour regarder les objets les plus éloignés; mais l'œil moins myope dont la vision distincte est à 20 centimètres emploie, pour lire commodément, des verres de 60 centimètres de distance focale principale, qui sont trop faibles pour regarder au loin.

Le presbyte est obligé d'ôter ses lunettes pour regarder un peu loin, parce que tous les objets dont la distance est plus grande que la distance focale principale de ses verres, enverraient à son œil de la lumière convergente qui, en général, trouble la vision; cependant il ne paraît pas impossible que certains yeux très-presbytes puissent voir plus nettement avec des rayons qui auraient un certain degré de convergence.

110. Loupes ou microscopes simples. — Un microscope simple n'est autre chose qu'une lentille convergente d'un très-court foyer; on l'appelle aussi une *loupe*. Cet instrument sert à voir de petits objets ou de petits détails qu'il serait impossible de saisir à la vue simple.

L'objet que l'on regarde à la loupe simple doit être toujours placé en avant *à une distance moindre que la distance focale principale;* sa position varie avec la portée de la vue, mais il est facile de déterminer dans tous les cas le point précis où il faut le tenir. En effet, soit x la distance à laquelle il faut placer l'objet au-devant d'une loupe, dont la distance focale principale est f, en supposant que l'œil de l'observateur soit appliqué immédiatement contre la loupe, et que pour lui la distance de la vision distincte soit représentée par d : il faut évidemment que les faisceaux qui partent de la distance x possèdent, après avoir traversé la loupe, la même divergence que s'ils venaient naturellement d'une distance d; c'est-à-dire qu'après l'émergence, ils doivent faire leur foyer virtuel à une distance d. On a donc :

$$\frac{1}{x}-\frac{1}{d}=\frac{1}{f};\quad \text{d'où}\quad x=\frac{df}{d+f}.$$

La marche des rayons est indiquée (Pl. 35, Fig. 1) : *ab* est la position de l'objet, *a'b'* celle de l'image virtuelle, et les triangles semblables *abc* et *a'b'c'* donnent pour le grossissement *g* :

$$g = \frac{a'b'}{ab} = \frac{cp'}{cp}, \quad \text{ou} \quad \frac{d}{x} = \frac{d+f}{f}.$$

Ce *grossissement* est le rapport entre la grandeur de l'image et celle de l'objet : on voit qu'il est plus grand pour les presbytes que pour les myopes.

Si l'œil était placé à une distance d' derrière la lentille on aurait :

$$x = \frac{f(d-d')}{d-d'+f}; \quad g = 1 + \frac{d-d'}{f};$$

on voit que *x* diminue et que le grossissement devient moins considérable. Voici la règle générale qu'il faut suivre pour trouver graphiquement un point de l'image correspondant à un point donné de l'objet, par exemple du point *a* : joignez le point *a* au centre optique *c* de la lentille, la ligne *ac* est l'axe du faisceau de lumière que la lentille reçoit du point *a*, c'est donc sur lui que se trouve l'image *a'*. La distance *ca'* étant donnée par la formule il suffit de la rapporter sur la figure. Alors en joignant le point *a'* à un point quelconque de la seconde face de la lentille, le prolongement de cette ligne est la route que prend celui des rayons émis par le point *a* qui est venu sortir en ce point de la deuxième face.

Quand l'œil est contre la lentille, il voit chaque point de l'image par l'axe du faisceau correspondant, mais lorsqu'il s'éloigne les axes lui échappent et il ne voit plus l'image que par des pinceaux obliques qui ont été réfractés près des bords de la lentille. En même temps il perd une portion croissante du champ de vision.

111. Chambre claire ou camera lucida. — Cet appareil sert à tracer l'image exacte d'un objet, d'un édifice, d'un paysage, etc. Il se compose essentiellement d'un prisme quadrangulaire *abcd* (Pl. 35, Fig. 2), ayant en *b* un angle droit, et en *d* un angle obtus de 135°. La face *cb* est tournée vers l'objet dont on veut prendre le dessin : *rx*, par exemple, étant l'axe d'un pinceau envoyé par un point de cet objet, on voit que ce rayon, après avoir pénétré perpendiculairement dans l'intérieur du prisme

par la face *cb*, éprouve en *r* une première réflexion totale sur *cd*, en *r'* une seconde réflexion totale sur *ad*, et vient enfin sortir perpendiculairement à la face *ab* près du sommet *a* du prisme. L'œil étant placé un peu au-dessus de cette face, de manière que la pupille soit en *pp'*, son milieu correspondant au sommet *a*, il est évident : 1° que par la moitié antérieure de la pupille on verra, par réflexion, l'image de l'objet *x* sur le prolongement *p'r'*; et 2° que par l'autre moitié de la pupille on verra directement le point d'un tableau horizontal, sur lequel cette image se projette. Ainsi, en tenant avec la main la pointe d'un crayon sur ce point du tableau, on pourra distinguer à la fois l'image et la pointe du crayon. Ce raisonnement s'appliquant aux points voisins du point *x*, il en résulte que l'on verra sur le tableau une image d'une certaine étendue, et la pointe du crayon en pourra tracer les contours les plus délicats. Tel est le principe sur lequel repose la construction de la chambre claire de Wollaston, et c'est seulement pour fixer les idées que nous avons supposé la pupille partagée en deux parties égales par la verticale du sommet *a*, car il est évident qu'elle peut varier de position dans de certaines limites : la seule condition importante est qu'elle reçoive à la fois des rayons réfléchis et des rayons directs.

Pour que cet instrument soit commode dans la pratique et ne fatigue pas la vue, il faut employer des verres colorés afin de donner à peu près le même éclat aux deux images, et des lentilles pour donner à leurs rayons le même degré de divergence. On peut faire aussi une chambre claire avec un simple miroir métallique percé d'un trou de 3 ou 4 millimètres; alors les objets s'aperçoivent directement par le trou, et le crayon est vu par réflexion sur le miroir.

112. Chambre noire. — La chambre noire est destinée à produire sur un tableau l'image réelle d'un champ de vision plus ou moins étendu. Dans sa construction la plus simple, elle consiste en un seul verre convergent *ll'* (Fig. 4), placé dans l'ouverture du volet d'une chambre complétement fermée *fghv*. Si du centre optique *c* de la lentille on décrit un cône dont l'angle *act* soit égal au champ qu'elle peut embrasser, tous les objets compris dans ce cône viendront former des images nettes à des distances plus ou moins grandes dans l'intérieur de la chambre noire. Il semble par conséquent qu'il soit impossible d'avoir à la fois l'image distincte de tout le paysage *at* : mais si

Digitized by Google

ce tableau est concave, et s'il est une portion de sphère *c'a'* d'un rayon égale à la distance focale principale de la lentille, il suffira de l'incliner convenablement en *c'a"*, par exemple, pour avoir une représentation fidèle de tout le champ de vision; seulement, s'il y avait des objets très-voisins, comme un arbre *b*, il serait impossible, en le regardant du point *c*, d'avoir en même temps son image et celle du sol sur lequel il se projette.

Dans cet appareil, les images sont *renversées* : pour les redresser et les amener à la portée de la vue, on place ordinairement un miroir étamé au dehors et en avant de la lentille; on obtient même par là un autre avantage, c'est qu'en faisant tourner le miroir ou en l'inclinant de diverses manières, on peut amener sur le tableau successivement tous les points de vue qui sont au-devant du volet. On parvient au même résultat au moyen du prisme ménisque de la figure 5, dont la base *ab* fait l'office de réflecteur, tandis que les faces *ac* et *cb* font l'office de lentille convergente.

Pour que les images soient plus vives et plus nettes, il est bon d'intercepter, avec des tubes, des écrans ou des diaphragmes convenablement ajustés, tous les rayons lumineux qui ne partent pas du champ de l'instrument.

La figure 3 représente une chambre noire portative. Il sera facile, d'après ce que nous venons de dire, d'en saisir la disposition.

113. Chambre noire photographique. — La chambre noire inventée à Naples, par Porta, vers 1570, n'avait servi, pendant près de trois siècles, qu'à l'amusement des amateurs et à quelques démonstrations scientifiques, comme nous venons de le voir. La découverte de Daguerre est venue donner à cet appareil une importance inattendue, inespérée. L'image si délicate qui se forme sur le tableau de la chambre noire peut s'imprimer d'elle-même et se fixer ensuite d'une manière durable. Au début de cette merveilleuse invention, il fallait longtemps, 4 ou 5 minutes, pour que les pinceaux de lumière pussent laisser sur le tableau des traces assez profondes; aujourd'hui on est parvenu à composer des tableaux qui ont presque la sensibilité de la rétine, la lumière y marque sa place dans un instant aussi court que l'instant nécessaire à une sensation : on peut recueillir au daguerréotype l'image d'un éclair. A ce progrès si surprenant s'en ajoute un autre qui n'a peut-être pas moins de portée : on

Digitized by Google

ne connaissait d'abord comme tableaux propres à recevoir les impressions et à fixer les images que les plaques argentées soumises à certaines préparations ; maintenant, on fait des tableaux non moins sensibles avec du papier, avec de la toile, avec un tissu quelconque, même avec des lames de verre recouvertes d'une couche imperceptible de certaines matières transparentes. La *photographie* est donc arrivée à un point où elle donne déjà des résultats du plus grand intérêt ; elle se compose de deux parties distinctes : les procédés optiques qui permettent d'obtenir des images parfaitement nettes et fidèles ; les procédés chimiques qui préparent les tableaux destinés à recevoir les images, et qui servent ensuite à faire prendre à ces images le lustre, la force et la solidité qu'elles doivent avoir.

Nous allons indiquer ici les principes des procédés optiques, en éprouvant le regret de ne pouvoir, faute de place, exposer au moins sommairement les actions chimiques de la lumière, pour les appliquer ensuite aux divers procédés photographiques.

Les objectifs des anciennes chambres noires ne pouvaient donner que des images imparfaites pour la photographie ; ils n'étaient pas achromatiques, ils avaient en général des foyers trop longs, et un champ trop restreint : les objectifs des lunettes n'avaient pas le premier inconvénient, mais ils conservaient quelque chose du second et du troisième. La construction des objectifs photographiques présentait donc à l'origine d'assez grandes difficultés, c'était un nouveau problème à résoudre dont, il est vrai, les travaux antérieurs avaient préparé la solution. Le point le plus important était d'obtenir des images bien planes d'une grande étendue, et en même temps parfaitement nettes au bord et au milieu ; quant à la longueur du foyer, elle a surtout de l'influence sur la rapidité de l'action. Parmi les combinaisons qui ont été imaginées et qui ont obtenu du succès, je me bornerai à citer comme exemple celle de M. Charles Chevalier ; sa chambre noire photographique est représentée (Pl. 36, Fig. 7, 8, 9). L'objectif se compose d'un système achromatique *a* porté par le tube conique *b*, et d'un verre auxiliaire *c* porté par le tube cylindrique *d*, qui s'adapte à vis sur le premier ; pour les objets éloignés le verre auxiliaire *c* doit être plus rapproché de *a*, et alors il faut un diaphragme *ee'* qui limite le champ ; pour les objets qui sont près, le verre auxiliaire doit être porté à une plus

grande distance de *a*, et le diaphragme n'est plus nécessaire; aussi dans ce cas on remplace le tube *d* par le tube *d'* (Fig. 8). Ces deux combinaisons donnent des images renversées, mais il est facile de les redresser, il suffit pour cela de placer au-devant du verre auxiliaire un prisme *f* (Fig. 7) dont l'hypoténuse est étamée, alors la lumière entre par la face *g*, éprouve une réflexion totale sur l'hypoténuse et pénètre dans le système des verres comme si elle se fût présentée directement dans le sens de leur axe.

Cet appareil optique se visse sur la partie antérieure de la chambre noire *hikl*, représentée en coupe (Fig. 9); comme la distance focale dépend de la distance de l'objet, il est nécessaire que la longueur de la chambre puisse augmenter ou diminuer, on a employé pour cela divers procédés : tantôt cette modification se produit mécaniquement au moyen d'un pignon et d'une crémaillère, comme l'indique la figure, où *m* est le bouton qu'il faut tourner pour éloigner ou rapprocher le fond de la chambre, tantôt c'est un emboîtement analogue à celui des tubes de lunettes; tantôt enfin la chambre, au lieu d'être faite de bois, n'est autre chose qu'une toile imperméable à la lumière et plissée de telle sorte qu'elle s'allonge ou se raccourcit à volonté, sans le moindre effort (Fig. 10), c'est une ingénieuse disposition imaginée par M. Humbert Demolard, très-habile amateur de photographie.

La mise au point se fait avec une glace dont le côté dépoli est tourné du côté de l'œil; elle s'ajuste dans un cadre qui termine la chambre du côté opposé à l'objectif; quand l'image se montre parfaitement nette sur la glace, on arrête l'allongement de la chambre dans cette position. La glace est alors enlevée, et à sa place on substitue le tableau qui doit recevoir l'image; tout est disposé à l'avance pour que son plan tombe exactement sur le plan qui était occupé par la glace dépolie. Dans l'intervalle on avait abaissé l'écran qui empêche la lumière d'arriver à l'objectif, et dès que le tableau est ajusté sur ses repères, on peut lever l'écran et compter, s'il est besoin, avec un sablier ou autrement, le temps précis pendant lequel le tableau reçoit l'image. L'écran est de nouveau rabattu et le tableau enlevé pour lui faire subir les opérations chimiques qui doivent faire ressortir les effets de la lumière et les fixer définitivement.

114. Microscope solaire. — Cet instrument, dont les effets

Digitized by Google

peuvent être comptés parmi les plus curieux et les plus instructifs de l'optique, se compose d'un système de verres pour éclairer l'objet, et d'un système de lentilles d'un court foyer pour en donner une image réelle. La figure 6 (Pl. 35) représente sur une échelle du quart de grandeur, le microscope solaire complet.

Le miroir *m* réfléchit la lumière solaire, et dirige dans le tube *t*, parallèlement à son axe, un faisceau qui en doit remplir toute l'étendue; la lentille éclairante *ir* imprime à la lumière de ce faisceau un premier degré de convergence; le *focus* *f*, qui la reçoit ensuite, la fait converger davantage, et de telle sorte qu'elle aille faire son foyer à très-peu près sur l'objet qui est en expérience. Pour remplir cette condition, il est nécessaire que le focus soit mobile, et on le fait mouvoir en effet au moyen d'une crémaillère qui règne le long de sa monture et d'un pignon dont le bouton *b* est au dehors du tube.

L'ajustement de l'objet est un point important : lorsqu'on veut observer, par exemple, les corps très-petits contenus dans les liquides, comme les globules du sang ou les animalcules de différentes espèces, ou les molécules cristallines que déposent les dissolutions en s'évaporant, etc., il suffit d'étaler une goutte de liquide sur une lame de verre à faces parallèles, et de porter cette lame sous la lumière du focus en tournant le liquide de son côté. Dans plusieurs autres circonstances l'objet doit être simplement placé entre deux lames de verre, et il y a des cas enfin où il faut l'enfermer dans une boîte à faces de verre remplie de liquide : c'est ce qui arrive quand on veut observer la circulation du sang dans la queue des têtards ou dans les extrémités de quelques poissons, et aussi quand on veut observer la circulation des globules du chara. Tous ces objets, disposés comme nous venons de le dire, peuvent être ajustés au microscope d'une manière commode au moyen du mécanisme qui est représenté (Fig. 6) : *p* et *p'* sont des lames carrées de cuivre, unies aux quatre coins par de petites tiges de même métal; sur chaque tige est un ressort en spire qui pousse la troisième plaque *q* contre la plaque *p'*; c'est entre *q* et *p'* que se glissent les lames ou les assemblages de lames qui portent l'objet. Ce système de plaques doit encore tourner autour du tube *t*, pour qu'il soit possible de donner à l'objet toutes les positions sans le déranger et même sans perdre de vue son image.

L'objet ainsi ajusté et convenablement éclairé par le focus, il

Digitized by Google

est facile d'en obtenir l'image amplifiée : pour cela, on fait mouvoir la lentille achromatique *l*, qui est véritablement la lentille objective ; cette lentille se déplace au moyen d'une crémaillère adaptée à sa monture, et d'un pignon dont le bouton est en *b'* ; on l'approche et on l'éloigne de l'objet jusqu'à ce qu'on obtienne enfin une image nette et brillante sur un grand tableau de toile blanche ou de papier placé à la distance de plusieurs mètres. Puisque l'image est réelle, il en résulte que l'objet se trouve au delà du foyer de la lentille *l*, et il sera facile, d'après nos formules sur les lentilles, de déterminer avec précision la position de l'objet, lorsqu'on connaîtra la distance focale principale de la lentille et la distance du tableau; il sera facile aussi d'en déduire le grossissement : mais si l'on veut observer le grossissement d'une manière directe, il faudra prendre pour objet un micromètre en verre portant des divisions de grandeur connue, et mesurer l'étendue que ces divisions occupent sur le tableau.

La *lanterne magique* repose sur les mêmes principes : seulement les objets grotesques que l'on y fait voir d'ordinaire sont peints sur verre et coloriés ; ils ont de grandes dimensions et sont éclairés par la lumière d'une lampe qui permet seulement de les grossir quinze ou vingt fois.

115. Mégascope. — Cet instrument est destiné à donner des copies, réduites ou amplifiées, d'une gravure, d'un tableau ou d'un bas-relief, qui n'a pas une trop grande étendue. Il a été imaginé par Charles vers 1780, et depuis cette époque on en a fait plusieurs applications intéressantes pour les arts. Le mégascope ne diffère du microscope solaire que par la nature des objets dont il donne les images, et par la manière dont ces objets sont éclairés. Ainsi, en dernier résultat, il se réduit à une seule lentille achromatique *l* (Pl. 35, (Fig. 7), au-devant de laquelle on place l'objet *b* dont on veut avoir l'image réelle sur un tableau, ou dont on veut prendre la copie.

Mais voici les principales conditions qu'il faut remplir pour avoir en même temps des images parfaitement nettes et pour varier les grossissements.

1° La lentille *l* doit avoir 8 à 10 centimètres de diamètre, afin d'embrasser un champ assez étendu et de donner assez de clarté à l'image ; elle doit être montée dans un tube un peu long qui arrête la lumière des nuées et les reflets latéraux ; on peut en-

Digitized by Google

core, pour mieux assurer cet effet, mettre dans le tube un diaphragme convenable; enfin, au lieu d'une seule lentille, on peut en mettre plusieurs à une petite distance l'une de l'autre, pour donner plus de convergence aux faisceaux incidents.

2° Au-devant de l'ouverture, à laquelle on adapte avec soin la monture de la lentille, se trouvent fixées au même niveau deux barres de fer horizontales qui supportent une espèce de char *c* qui roule sur des galets, et dont la planche verticale *v* est destinée à recevoir les objets; une double corde, dont les extrémités reviennent dans la chambre noire, est attachée au char, et sert à le faire avancer ou reculer, pour approcher ou éloigner l'objet *b*; enfin deux ou plusieurs miroirs plans de verre étamé sont disposés au-devant du volet pour réfléchir sur l'objet la lumière du soleil, et projeter les ombres dans un sens ou dans l'autre : lorsqu'on expérimente sur des bas-reliefs, les miroirs peuvent être fixés au char pour se mouvoir avec lui.

3° Le tableau sur lequel on reçoit les images peut être en papier ou en mousseline comme pour le microscope solaire; alors on observe par devant : cependant, les jeux de lumière que donnent les reliefs se font beaucoup mieux sentir lorsqu'on reçoit les images sur une grande glace convenablement doucie ou dépolie; alors on observe par derrière, et dans ce dernier cas les images peuvent être calquées avec beaucoup de facilité.

116. Microscope photo-électrique. — Cet appareil, qui a été imaginé par MM. Donné et Foucaut, et que j'ai décrit en 1848 sous sa forme primitive et naissante, dans la cinquième édition de cet ouvrage, est devenu l'instrument le plus indispensable d'un cours d'optique. C'est une source de lumière toujours prête, elle paraît au moment où l'on ferme le circuit électrique, elle s'éteint quand on l'ouvre, sans qu'il y ait autre chose à faire que le petit mouvement du doigt qui accomplit ces deux opérations; tant que le courant passe, et pendant des heures entières, elle brille d'un éclat éblouissant, comparable à celui du soleil, toujours égal, sans nuages ni intermittences; c'est un soleil artificiel avec lequel on peut faire toutes les expériences d'optique, même celles qui exigent la plus vive lumière. On lui conserve cependant le nom trop restreint de microscope photo-électrique, parce qu'on s'en est servi d'abord pour faire les expériences du microscope solaire.

M. Duboscq en a modifié le mécanisme, et je vais le décrire

Digitized by Google

sous la forme simple et commode qu'il est parvenu à lui donner par plusieurs dispositions très-ingénieuses (Pl. 36, Fig. 1, 2). La lumière est produite par le courant électrique d'une pile de 60 ou 100 éléments Bunsen, franchissant l'intervalle qui sépare deux baguettes de charbon *a* et *b* mises en regard bout à bout; la vivacité de l'éclat dépend de la distance des charbons, et tout le mécanisme a pour objet de maintenir invariable cette distance qui tend à varier sans cesse, soit à cause de la combustion qu'ils éprouvent, soit surtout à cause du transport continuel qui se fait du charbon positif au charbon négatif. On peut à la rigueur employer toute espèce de charbon, pourvu qu'il soit bon conducteur; mais, celui qui donne la plus belle lumière, sans fumée ni pétillement, est le charbon qu'on appelle charbon de cornue, parce qu'il se dépose dans les cornues qui servent à produire le gaz d'éclairage; il est plus dur que l'acier, homogène comme la plombagine, et très-bon conducteur; on le travaille, à la scie, en baguettes carrées de quatre ou cinq millimètres de côté, qui s'adaptent dans des viroles de métal, pour recevoir et transmettre le courant. C'est là ce que nous appelons le charbon positif et le charbon négatif; ils sont disposés verticalement, et il s'agit de combiner un mécanisme au moyen duquel les deux pointes, malgré leur usure très-inégale, soient maintenues à la même distance, le milieu de leur intervalle restant de plus à la même hauteur verticale, afin que la source de lumière soit toujours dans l'axe de l'appareil optique. Il y a pour cela un *moteur* et un *régulateur :* le moteur tend sans cesse à rapprocher les charbons, le régulateur le retient et ne lui permet d'agir qu'au moment où cela est nécessaire, et juste pendant le temps qui convient.

Le *moteur* est simplement un ressort enfermé dans un barillet et roulé sur un axe qu'il tend à faire tourner.

Le *régulateur* est un électro-aimant qui laisse détacher son armature quand le courant est trop faible, et permet ainsi l'action du moteur; mais qui reprend son armature aussitôt que le courant a repris son énergie, et empêche par là un trop grand rapprochement des charbons.

Le charbon inférieur est en général en communication avec le pôle positif, et le charbon supérieur avec le pôle négatif; les tubes de métal *c* et *d* qui les portent doivent être libres dans leurs supports, afin de pouvoir aisément monter et descendre,

Digitized by Google

il faut cependant qu'ils reçoivent le courant, et ils le reçoivent par des ressorts qui les pressent, l'un en *c'*, l'autre en *d'*. Ainsi, le bouton *p* destiné à recevoir le pôle positif de la pile transmet le courant à la bobine de l'électro-aimant *e* composé d'un tube de fer, formant guide et support pour le tube *c*; l'autre extrémité du fil de la bobine est fixée au tube de fer d'où le courant se transmet à toutes les pièces de métal et au ressort *c'*. Le bouton *n* destiné à recevoir le pôle négatif de la pile, tient au tube *t* qui est isolé par de l'ivoire de toute la partie inférieure de l'appareil; l'électricité s'élève donc par la matière du tube *t* pour arriver au ressort *d'*, au tube *d* et au charbon *b*. La chaîne de métal qui passe dans l'intérieur du tube *t* est interrompue aussi par une tige d'ivoire, sans quoi elle établirait une communication entre les pôles.

Quand le courant passe avec une intensité suffisante, l'électro-aimant *e* attire son armature, fait marcher en même temps un système de leviers qui vient engager l'arrêt *f* dans la roue dentée *g*, et l'action du ressort moteur est suspendue; quand le courant manque de force, l'armature ne peut plus être tenue en prise, elle est relevée par un ressort, le système des leviers auxquels elle est liée la meut en sens contraire, l'arrêt *f* se dégage, la roue *g* devient libre et le ressort moteur peut enfin agir et rapprocher les charbons.

Donnons une idée de ce mouvement assez complexe.

Sur l'axe *g* (Fig. 2) se meuvent ensemble ou séparément plusieurs pièces, les unes fixées sur l'axe, les autres retenues seulement par des frottements différents. Le barillet *h*, contenant le ressort moteur, est fixe, tandis que les deux poulies *i* et *k* sont à frottement; sur la poulie *i* s'enroule la chaîne du charbon positif, sur la poulie *k* celle du charbon négatif, la figure fait assez voir comment ces chaînes, après être passées sur diverses poulies de renvoi, viennent s'attacher, l'une au tube du charbon positif, l'autre au tube du charbon négatif; ainsi, dès que le ressort moteur reçoit de l'électro-aimant la liberté d'agir, les charbons se rapprochent. Cependant ils ne doivent pas faire le même chemin, parce qu'ils s'usent inégalement et que le milieu de leur intervalle doit rester à la même hauteur; M. Duboscq y a pourvu : la poulie *k* change de diamètre et se règle à volonté. Elle est faite de deux platines, l'une portant six rayons articulé, près du centre, dont les extrémités libres déterminent une cir-

Digitized by Google

conférence plus grande ou plus petite, suivant qu'ils sont moins ou plus inclinés; l'autre porte six fentes obliques dans lesquelles viennent passer six goupilles formant les extrémités libres des rayons; ainsi, en tournant cette dernière platine, les rayons s'ouvrent ou se ferment et la circonférence des goupilles est plus grande ou plus petite. Un ressort de montre fixé à l'une de ces goupilles et faisant environ un tour et demi en s'appuyant sur les autres, forme la gorge de la poulie; la chaîne est attachée à l'autre extrémité de ce ressort et contribue à le serrer. On règle le diamètre de cette poulie d'après ce que l'expérience donne sur l'usure relative des charbons, et, une fois réglé, l'appareil marche sans varier d'éclat.

Quelques mots suffiront maintenant pour expliquer l'usage de l'appareil. Sur la monture fixe y, s'adapte une large lentille convergente x, dont la longueur focale est à peu près égale à la distance comprise entre sa surface et les pointes des charbons, on obtient ainsi un grand faisceau de très-vive lumière, que l'on rend à volonté faisceau parallèle, faisceau divergent ou convergent par de petits déplacements que la lentille x peut recevoir. On opère ensuite sur ce faisceau comme sur la lumière solaire elle-même; veut-on, par exemple, faire les expériences du microscope solaire, à la suite de la lentille x on adapte le microscope solaire ordinaire; veut-on faire les expériences de décomposition et de recomposition de la lumière, on adapte sur la monture y la plaque ordinaire à diaphragmes de divers diamètres, puis les prismes et les autres appareils, exactement comme pour la lumière solaire. Il en est de même encore quand on veut produire les phénomènes de diffraction et de polarisation chromatique dont nous devons nous occuper plus loin.

Quelquefois il faut atténuer la chaleur de cette lumière pour qu'elle n'altère pas les petits objets qu'elle frappe; alors on met en dedans de la boîte, entre les charbons et la lentille x une épaisse lame d'eau contenue dans un vase rectangulaire ayant deux de ses faces formées avec des glaces minces et parallèles.

Parmi les expériences les plus curieuses on peut citer celles qui se font sur le foyer de lumière lui-même, amplifié comme objet du microscope solaire. On voit de cette manière le transport des molécules pondérables entre les deux pôles opposés (Fig. 12); et si l'on prend pour pôle positif une coupelle de charbon dans laquelle on place successivement un petit bouton des diverses

Digitized by Google

substances à essayer, platine, or, argent, etc. (Fig. 11), on voit ces globules se fondre, se vaporiser, donner des flammes de diverses couleurs, etc.; on peut même par la décomposition de ces lumières, au moyen d'un prisme, étudier aisément les éléments qui les composent, et les raies magnifiques qu'elles présentent presque toujours très-éclatantes par opposition à celles de la lumière solaire que nous avons décrites précédemment (n° **99**).

117. Microscope composé. — Principes de la construction du microscope composé. — Le microscope composé est destiné, comme le microscope simple, à faire voir la forme, la structure et tous les détails des objets très-petits. On l'appelle microscope *dioptrique*, *catoptrique* ou *catadioptrique*, suivant que les amplifications y sont produites par la *réfraction*, par la *réflexion*, ou par la *réflexion* et la *réfraction* réunies. Nous nous occuperons particulièrement ici du *microscope dioptrique*, parce qu'il est à la fois le plus utile et le plus répandu.

Les dispositions très-diverses que l'on a successivement données à cet instrument reposent en dernier résultat sur les deux principes suivants :

1° Les objets que l'on veut soumettre à l'expérience se placent au-devant d'une lentille convergente *b*, et un peu au delà de la distance focale principale (Pl. 35, Fig. 8). Cette lentille simple ou composée, achromatique ou non achromatique, se nomme la *lentille objective* ou l'*objectif* du microscope.

2° Les images réelles et amplifiées que donnent les objets, à une distance plus ou moins grande derrière l'objectif, sont regardées avec une lentille convergente *c* qui fait l'office d'une loupe. Cette seconde lentille, qui peut aussi être simple ou composée, achromatique ou non achromatique, se nomme la *lentille oculaire* ou l'*oculaire* du microscope.

Ainsi, tout microscope dioptrique est essentiellement composé d'un objectif et d'un oculaire, et le grossissement définitif est le produit des grossissements qui résultent de chacun de ces verres ou de chacun de ces systèmes de verres. Si l'objectif grossit, par exemple, 5 fois en diamètre, et l'oculaire 10 fois, le grossissement sera 50 en diamètre, et par conséquent 2500 fois en surface; il serait 1000 fois en diamètre, et 1 000 000 de fois en surface, si les amplifications de l'objectif et de l'oculaire étaient respectivement 100 et 10, ou 50 et 20, ou 40 et 25, etc.

En ne considérant que ces principes fondamentaux du mi-

Digitized by Google

croscope, il serait facile d'en calculer en même temps les dimensions et les effets. Supposons, par exemple, que l'objectif ait 5 millimètres de distance focale principale, et l'oculaire 20 : l'objet étant placé à $\frac{1}{10}$ de millimètre au delà de la distance focale principale, son image réelle se formerait à 255 millimètres, et l'amplification de l'oculaire serait 40 ; pour un objet de $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre, l'image aurait donc 4 millimètres d'étendue. Ensuite, pour regarder cette image avec l'oculaire, il faudrait placer celui-ci à $18^{mm},62$ au-devant de l'image (en supposant une vue moyenne de 10 pouces ou 270 millimètres), et l'on aurait encore un grossissement de 14,5 ; ce qui donnerait un grossissement définitif de $40 \times 14,5 = 580$: dans cette hypothèse, l'instrument devrait avoir une longueur de $255 + 18,62 = 273^{mm},62$.

Avec le même objectif et le même oculaire on pourrait obtenir d'autres amplifications, moindres ou plus grandes, suivant que l'on placerait l'objet à des distances plus grandes ou moindres au-devant de l'objectif; mais en même temps il faudrait pouvoir raccourcir ou allonger l'instrument, c'est-à-dire diminuer ou augmenter la distance des deux verres, car le lieu de l'image réelle se rapprocherait ou s'éloignerait de l'objectif.

L'instrument dont nous venons d'indiquer la théorie est le microscope dioptrique dans toute sa simplicité, ou plutôt dans toute son imperfection, et tel qu'il sortit des mains des premiers inventeurs, vers 1620; mais, depuis cette époque, on y a fait de nombreux changements. M. Amici, de Modène, est parvenu, par d'heureuses recherches, à lui donner enfin, il y a quelques années, un degré de perfection qui laissait peu à désirer; et M. Ch. Chevalier, profitant de ces recherches, en a varié avec succès la disposition pour l'approprier à tous les genres d'observation. Nous décrirons donc de préférence le microscope de M. Ch. Chevalier.

118. Le *microscope composé* est représenté au quart de grandeur naturelle (Pl. 35, Fig. 9). L'objectif est en *b*, l'oculaire en *c* ; le faisceau de lumière par lequel on voit l'objet s'élève d'abord verticalement, mais, au moyen d'une réflexion totale sur l'hypoténuse du prisme *r* (Fig. 8), ce faisceau est renvoyé horizontalement vers l'oculaire, ce qui permet à l'observateur de prendre une position commode, soit pour varier ou prolonger ses expériences, soit pour dessiner les images qu'il aperçoit.

Digitized by Google

Voici, maintenant, la disposition des diverses pièces et leur mécanisme.

1° *Objectif.* — L'objectif se compose d'une, deux ou trois lentilles achromatiques, dont les distances focales principales sont de 8 à 10 millimètres; elles portent les n[os] 1, 2, 3; on peut employer la lentille n° 1 seule, ou les lentilles n° 1 et n° 2, avec l'attention de visser la première sur le tube, et la seconde sur la première; ou les lentilles n° 1, n° 2 et n° 3, avec l'attention de conserver encore leur ordre naturel en vissant le n° 3 sur le n° 2. Dans le premier cas, on a le moindre grossissement, et l'objet se trouve le plus loin possible de l'objectif; dans le second cas, le grossissement est plus fort, et l'objet plus près; enfin, dans le troisième cas, le grossissement est plus fort encore, et l'objet se trouve amené à une très-petite distance de l'objectif.

2° *Oculaire.* — Pour chacune des combinaisons de l'objectif, on peut adapter à l'instrument l'un des six oculaires qu'il porte sous les n[os] 1, 2, 3, 4, 5 et 6. Les quatre premiers sont construits sur le même principe; chacun d'eux se compose de deux verres plans convexes, dont la convexité est tournée du côté de l'image; entre ces verres, et au point précis où vient se faire l'image réelle de l'objet, se trouve un diaphragme dont l'ouverture est convenablement déterminée; dans cette ouverture on place ordinairement, à angle droit, deux fils très-fins qui servent de micromètre. Les oculaires n° 5 et n° 6 sont de simples loupes d'un foyer très-court.

3° *Ajustement et éclairage des objets transparents.* — Les objets transparents doivent toujours être placés entre deux lames de verre, et on les mouille d'une goutte d'eau pure pour qu'ils soient complétement environnés de ce liquide. Ces lames en général se maintiennent d'elles-mêmes à une distance convenable sans altérer l'objet. S'il arrive, dans quelques occasions, que l'objet doive être simplement placé à sec sur une lame transparente, on peut bien encore l'observer avec le même grossissement, mais son image est toujours moins claire et moins distincte. Le système des lames se place sur l'ouverture *v* du porte-objet, et la pièce *d*, qui s'élève ou s'abaisse à frottement, sert à les maintenir et à les presser.

Le miroir concave *m* rassemble la lumière des nuées ou celle d'une lampe pour la concentrer sur l'objet. Le diaphragme mo-

Digitized by Google

bile f sert à modérer l'éclat de la lumière; on le fait tourner plus ou moins pour amener celle des ouvertures qui convient le mieux à l'objet qui est soumis à l'expérience : en général, les corps très-minces et très-transparents exigent une lumière moins éclatante. Au-dessous du diaphragme se trouve encore un verre dépoli, que l'on tourne de manière à recevoir le faisceau lorsqu'on veut employer la lumière solaire ou celle d'une forte lampe.

Enfin, l'objet est amené près du foyer au moyen d'un pignon dont le bouton est en p, et la vis micrométrique p' sert à le mettre exactement au point.

4° *Ajustement et éclairage des corps opaques.* — Les corps opaques doivent être placés sur un très-petit disque de verre noir collé sur une lame transparente, et mis ensuite sur le porte-objet : alors, pour les éclairer, on peut se servir ou d'une lentille ou d'un miroir, ou de ces deux moyens réunis.

5° *Moyens de parcourir le champ.* — Il y a pour cela deux vis micrométriques k et q : la première sert à pousser en avant ou à retirer en arrière le char du porte-objet et tout ce qu'il porte; la seconde sert à le faire marcher latéralement de droite à gauche ou de gauche à droite. Au moyen de ces deux mouvements combinés on peut parcourir toute l'étendue de l'objet dans un sens ou dans l'autre sans perdre de vue son image.

6° *Grossissement.* — L'un des meilleurs moyens de déterminer la force amplifiante du microscope est d'employer une chambre claire qui s'adapte à l'oculaire dont on fait usage, afin de voir en même temps un micromètre de verre mis au-devant des lentilles comme objet, et une règle divisée mise dans la verticale de l'oculaire à une distance convenable : l'image amplifiée du micromètre se projette sur la règle, et l'on peut lire aisément le nombre des divisions qu'elle y occupe. Dans ce microscope, les combinaisons d'objectifs et d'oculaires qui ne grossissent pas plus de 500 fois en diamètre, donnent des images d'une netteté remarquable. Les combinaisons qui portent le grossissement à 1000, 2000, 3000 ou 4000 fois, donnent des images un peu confuses.

Quelquefois, on se contente de mesurer le grossissement ou plutôt la grandeur réelle des objets au moyen des vis micrométriques k et q dont nous avons parlé; ces vis ont un pas très-petit et déterminé d'avance; en outre, leurs têtes sont divisées, en sorte qu'il suffit de voir de combien de tours ou de fractions de

Digitized by Google

tours il faut tourner pour faire passer un objet d'un côté à l'autre du fil micrométrique de l'oculaire, dont la disposition est indiquée plus haut.

Ce microscope peut être placé verticalement. Il suffit pour cela de dévisser le prisme, de mettre les lentilles dans le prolongement du tube, et de faire tourner celui-ci autour du genou z; on peut même, au moyen du second genou z', rendre la pièce zz' verticale, mettre le tube horizontal, et observer sur le porte-objet, qui est alors vertical. Enfin, le même instrument prend avec la plus grande facilité la disposition convenable pour les observations chimiques : pour cela on tourne la pièce *br*, qui tient au tube par un mouvement de baïonnette, et on lui donne la position indiquée dans la figure 10; sur le porte-objet se dispose un petit verre de montre contenant la dissolution soumise à l'expérience; un miroir m' sert à l'éclairage.

La figure 11 représente le microscope *catadioptrique*, dont la théorie est indiquée dans la figure 12. L'objet est en v'; un petit miroir plan m' renvoie les rayons sur le grand miroir métallique concave m, d'où ils reviennent former une image réelle qui s'observe avec les oculaires ordinaires.

Nous avons réuni dans la planche 37 les découvertes les plus remarquables et les plus récentes qui ont été faites au moyen du microscope; on en trouvera la description dans le chapitre suivant.

119. Détermination des indices de réfraction des liquides et des corps mous translucides au moyen du microscope. — Supposons que l'on ait formé avec deux substances différentes, ayant des indices de réfraction n et n', des ménisques plans concaves de même rayon r : on sait que les distances focales principales f et f' de ces ménisques seront :

$$f = \frac{r}{n-1}, \quad f' = \frac{r}{n'-1}; \quad \text{d'où} \quad n' = 1 + (n-1)\frac{f}{f'};$$

ce qui donnerait n' au moyen de n, si l'on connaissait le rapport $\frac{f}{f'}$.

Pour former des ménisques de diverses substances qui soient tous plans concaves et de même rayon de courbure, il suffit de placer un fragment de ces diverses substances sur un verre plan à faces parallèles, et ensuite d'exercer une pression avec une

Digitized by Google

lentille convexe, au point que le sommet de la convexité touche presque la surface du plan.

Or, si, pour faire cette expérience, on prend la lentille objective d'un microscope, et qu'on la reporte ensuite à l'instrument pour faire successivement trois observations sur un objet quelconque, la première avec la lentille seule et isolée, la deuxième avec la même lentille et un ménisque d'eau, et la troisième avec la même lentille encore et un ménisque d'une substance quelconque, de cire par exemple, on pourra facilement en déduire l'indice de réfraction de la cire. En effet, soient b, b' et b'', la distance de l'objectif à l'objet dans la première, la deuxième et la troisième observation; soient φ, φ' et φ'' les distances focales principales de la lentille objective seule, de la lentille objective avec le ménisque d'eau, et de la lentille objective avec le ménisque de cire, soit enfin m la distance à laquelle l'image se forme derrière l'objectif, distance qui reste la même dans les trois cas. On a évidemment, pour la première et la seconde observation :

$$\frac{1}{m}=\frac{1}{\varphi}+\frac{1}{b},\quad \frac{1}{m'}=\frac{1}{\varphi'}+\frac{1}{b'}.$$

Mais φ' étant la distance focale principale du système lentille et ménisque d'eau, il est clair que, si l'on mettait un point lumineux à une distance b', au-devant du ménisque d'eau seul, le point lumineux formerait son image à une distance φ; et, puisque nous avons supposé que f était la distance focale principale du ménisque d'eau seul, on aura :

$$\frac{1}{\varphi}=\frac{1}{f}+\frac{1}{\varphi'}.$$

Cette équation, combinée avec les deux précédentes, donne :

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{b'}-\frac{1}{b}.$$

La première et la troisième observations, combinées de la même manière, donneront pareillement :

$$\frac{1}{f'}=\frac{1}{b''}-\frac{1}{b},$$

d'où l'on déduira le rapport cherché $\frac{f}{f'}$.

Digitized by Google

TÉLESCOPES.

120. La pièce essentielle de tous les télescopes est un grand miroir concave de métal qui est tourné vers l'objet et qui en donne une image réelle et renversée d'après les lois dont nous avons précédemment parlé (**77**). Mais, comme il y a diverses manières d'observer cette image, il en résulte divers instruments que nous allons successivement examiner.

Télescope de Gregory. — Le grand miroir concave *mm'* (Pl. 35, Fig. 13) est percé en son centre de figure d'une ouverture circulaire *cc'*. Les rayons incidents *ll'* vont former en *ii'* une image réelle et renversée de l'objet; cette image tombe audevant du petit miroir concave *v*, à une distance un peu plus grande que la moitié du rayon; alors elle devient comme un objet, et donne naissance à une seconde image redressée, qui est renvoyée dans l'ouverture *cc'*; là, un oculaire la reçoit pour l'amplifier encore, et l'œil la regarde en *o*; une grande vis *ss'*, dont le bouton est *b*, sert à à éloigner ou à rapprocher le miroir *v*, suivant que l'objet qu'on observe est plus près ou plus loin.

Télescope de Cassegrain. — Au petit miroir concave *v* de Gregory, Cassegrain substitue un petit miroir convexe *x* (Fig. **14**) qui doit recevoir les rayons *avant* qu'ils aient formé l'image réelle de l'objet : alors les rayons sont non-seulement réfléchis, mais leur convergence est diminuée, et l'image réelle et renversée vient se former au même lieu que la seconde image du télescope de Gregory; là elle est reçue sur l'oculaire, et l'œil l'observe comme dans le cas précédent.

Télescope de Newton. — Au lieu d'un petit miroir concave ou convexe, Newton emploie un petit miroir plan *p* (Fig. **15**) qui reçoit le faisceau sous un angle de 45° pour projeter l'image réelle latéralement sur un oculaire semblable aux précédents.

L'invention du télescope remonte à l'année 1663, elle est due à Gregory, d'Aberdeen; il est présumable que Newton en avait connaissance, lorsqu'il fit lui-même en 1666 construire son télescope, d'un système un peu différent; la modification apportée par Cassegrain date seulement de 1672, son seul avantage est de réduire la longueur de l'appareil d'une quantité égale au double de la distance focale du petit miroir. Le télescope de Gregory

Digitized by Google

est le seul qui ait rendu des services à l'astronomie pendant à peu près un siècle, jusqu'à l'instant où W. Herschel réussit à construire lui-même des télescopes d'une dimension colossale, qui devaient lui permettre de pénétrer dans le ciel à des profondeurs incomparablement plus grandes. Le système newtonien était le seul qui pût se prêter avec avantage à ces constructions gigantesques, parce que le grand miroir reste entier, sans ouverture au milieu, et parce que l'observateur peut se placer où bon lui semble. Le plus puissant des télescopes de W. Herschel fut achevé vers 1780; le réflecteur a plus de 4 pieds de diamètre (49 pouces $\frac{1}{2}$ ou $1^m,25$), la longueur du tube est de près de 40 pieds (39 pieds ou $11^m,90$) et son diamètre de près de 5 pieds (58 pouces ou $1^m,50$); le miroir seul, de 9 centimètres d'épaisseur, pèse environ 1000 kilogrammes. De telles masses se manœuvraient cependant facilement, parce qu'elles étaient établies sur une vaste plate-forme de chêne de 50 pieds de diamètre, tournant elle-même sur une solide plate-forme de pierre au moyen d'un axe central et de 20 galets métalliques. Dans les observations voisines du zénith, le tube étant presque vertical, le miroir en formait le fond et reposait directement sur la plate-forme mobile; là était le point d'appui de tous les mouvements verticaux du tube; quant au mouvement latéral il s'obtenait par la rotation de la plate-forme elle-même. Après quelques essais, W. Herschel reconnut qu'il fallait supprimer le petit réflecteur de Newton, et adopter ce qu'il appelle la *vue de front*, ce mode consiste à faire venir l'image réelle à la bouche même du tube, non pas dans l'axe, mais près du bord, et à l'observer là directement avec des oculaires convenables (voy. plus loin n° 123 la disposition des oculaires, qui est à peu près la même pour les télescopes et les lunettes); ainsi l'observateur, par d'ingénieux moyens mécaniques, est suspendu au sommet du tube, et le haut de sa tête n'arrête presque aucun des rayons qui vont au réflecteur, dont le diamètre est à dessein moindre que celui du tube. Avec des oculaires simples, analogues à des lentilles de microscope, d'un court foyer, W. Herschel obtenait des grossissements de 6000 et même de 6450. D'autres télescopes de 20 pieds de longueur se trouvaient pareillement à l'observatoire de Slough, et M. J. Herschel, avait emporté l'un de ces appareils au cap de Bonne-Espérance, dans le voyage qu'il a entrepris de 1834 à 1838 pour aller étudier le ciel de l'hémisphère

Digitized by Google

austral. C'est à bon droit que le télescope newtonien est maintenant appelé télescope herschélien.

Parmi les grands appareils modernes de ce système on doit citer celui de lord Ross, en Irlande, et celui de M. Lassell près de Liverpool, qui ont servi l'un et l'autre à des découvertes récentes d'un très-haut intérêt (voy. chapitre VII).

LUNETTES.

Toutes les lunettes se composent d'un objectif et d'un oculaire. L'objectif est destiné à recevoir la lumière des objets et à la concentrer pour former en son foyer des images réelles et renversées tout à fait analogues à celles qui viennent se peindre sur le tableau de la chambre noire ; l'objectif doit donc être parfaitement achromatique pour que les images soient nettes et sans couleur; par conséquent, il doit toujours être composé au moins de deux substances inégalement dispersives : l'une travaillée en lentille convergente, l'autre en lentille divergente. Dans les lunettes ordinaires, ces lentilles sont contiguës; dans les lunettes *dialithiques*, on conserve entre elles un espace plus ou moins grand, ce qui permet de donner à la seconde lentille bien moins de largeur qu'à la première. La composition de l'oculaire est bien plus variable que celle de l'objectif : il se réduit à une simple *lentille divergente* dans la *lunette de Galilée* ou *lunette de spectacle;* il se compose d'*une* ou de *deux lentilles convergentes* dans la *lunette astronomique;* enfin, il se compose de *quatre lentilles convergentes* dans la *lunette terrestre.*

Dans toutes les lunettes, la position de l'oculaire par rapport à l'objectif se détermine par ce principe, que les rayons d'un même faisceau, c'est-à-dire, ceux qui sont émis par un même point de l'objet, doivent être sensiblement parallèles entre eux lorsqu'ils sortent de l'oculaire. Ce principe n'est pas rigoureusement vrai, puisque la vision distincte ne peut s'accomplir que par des rayons plus ou moins divergents, suivant que l'organe est myope ou presbyte ; mais il est suffisamment approché pour donner une idée très-nette des phénomènes.

121. Lunette de Galilée ou lunette de spectacle. — Soient a la position de l'objectif (Fig. 16), et f sa distance focale principale : s'il n'y avait pas d'oculaire, un objet très-éloigné formerait son image en tt' à une distance f derrière l'objectif;

cette image serait renversée, et du centre optique a elle serait vue sous le même angle que l'objet. Il s'agit maintenant de placer un oculaire divergent a', ayant une distance focale principale f', de telle sorte que les rayons d'un même faisceau soient parallèles entre eux au sortir de a'. Or, cette condition ne peut être remplie qu'en plaçant cet oculaire à une distance $f-f'$ de l'objectif, puisque alors les rayons qu'il reçoit, allant converger en tt' ou au foyer principal de l'oculaire, seront rendus parallèles par son action divergente. Ainsi, dans la lunette de Galilée, la distance des deux verres est égale à la différence de leurs distances focales principales.

Il résulte de là : 1° que l'oculaire redresse l'image ; 2° que le grossissement est égal à $\frac{f}{f'}$. En effet, les rayons qui allaient converger au point t deviennent parallèles entre eux, et leur direction commune est celle de la ligne ta', menée du point t par le centre optique a' de l'oculaire ; de même ceux qui allaient converger en t' sortent parallèles à l'axe secondaire $t'a'$; ainsi, l'image renversée tt' se trouve redressée, puisque le point t, qui était en bas, se trouve vu en haut en n sur la direction de t en a', et réciproquement le point t' est vu en n' sur la direction de t' en a'.

Pour avoir le grossissement, il suffit de remarquer que la portion tp de l'image aurait été vue du centre de l'objectif sous le même angle tap que la portion correspondante de l'objet, tandis qu'au moyen de l'oculaire elle est vue sous l'angle $ta'p$. Ainsi, le grossissement est :

$$\frac{ta'p}{tap}=\frac{\text{tang } ta'p}{\text{tang } tap}=\frac{f}{f'},$$

puisqu'on peut substituer les tangentes aux angles, et prendre les valeurs des tangentes dans les triangles rectangles tap et $ta'p$.

Le champ de ces lunettes ne peut guère dépasser 5 ou 6° ; leur clarté dépend évidemment du diamètre de l'objectif et du grossissement.

122. Lunettes astronomiques. — Dans les lunettes astronomiques, l'image se forme réellement au foyer de l'objectif, et l'oculaire n'est qu'une sorte de loupe qui sert à la regarder. Soient f la distance focale principale de l'objectif, et tt' (Fig. 17) l'image réelle et renversée d'un objet très-éloigné : l'oculaire a'

Digitized by Google

ayant une distance focale f', et devant agir pour que tous les rayons d'un même faisceau sortent parallèlement entre eux, il est évident qu'il doit être placé à une distance f' derrière l'image tt', et par conséquent à une distance $f+f'$ derrière l'objectif.

Il résulte de là : 1° que l'image est renversée; 2° que le grossissement est exprimé par $\frac{f}{f'}$. En effet, les rayons qui ont formé l'image au point t sont réfractés par l'oculaire de manière à émerger parallèlement à l'axe secondaire ta'; l'œil qui les reçoit au sortir de l'oculaire voit donc le point t sur le prolongement de $a't$ vers n; de même t' est vu vers n' sur le prolongement de $a't'$. Ainsi, l'image virtuelle est vue dans le même sens que l'image réelle, et se trouve par conséquent renversée comme elle par rapport à l'objet. Pour avoir le grossissement, il suffit de remarquer que la portion tp de l'image réelle est vue au moyen de l'oculaire sous l'angle $ta'p$, tandis que du centre de l'objectif elle serait vue comme la partie correspondante de l'objet sous l'angle tap. Le grossissement est donc :

$$\frac{ta'p}{tap} = \frac{\text{tang } ta'p}{\text{tang } tap} = \frac{f}{f'}.$$

123. Oculaires. — L'oculaire simple dont nous venons de parler s'emploie rarement : on s'en sert lorsqu'on veut avoir des pouvoirs amplifiants considérables, en sacrifiant quelque chose de la pureté de l'image. Les meilleurs oculaires se composent de deux verres convergents, plans convexes : on les appelle *positifs* quand ils sont disposés à la manière de Ramsden pour que l'image réelle de l'objectif se forme au dehors du système des verres, alors les convexités se regardent et les deux faces planes sont en dehors; on les appelle *négatifs* quand ils sont disposés à la manière d'Huyghens pour que l'image réelle de l'objectif se forme entre les deux verres, alors les deux faces planes sont tournées du côté de l'œil. Bien que les dimensions des oculaires soient toujours petites, et quelquefois très-petites par rapport à celle de l'objectif, leur construction présente aussi de grandes difficultés, elle exige une foule de précautions délicates pour l'achromatisme et l'aberration afin d'arriver à des compensations convenables sans lesquelles on n'obtient jamais que des images imparfaites. Les plus habiles opticiens modernes,

Digitized by Google

à la tête desquels il faut placer Frauenhofer et Cauchoix, ont accordé la préférence aux oculaires négatifs, et je puis donner ici, d'après des renseignements particuliers, les règles auxquelles ils ont été conduits, non moins par la théorie que par la pratique. Ces règles au reste se rapportent en plusieurs points à celles qui avaient été données par Smith, d'après l'habile constructeur Short.

Indiquons d'abord d'une manière générale la marche des pinceaux de lumière : elle est tracée (Pl. 35, Fig. 18), mais elle est reproduite avec plus de correction et de détail (Pl. 36, Fig. 14); c'est ici un oculaire réel avec ses dimensions naturelles. *a*, centre optique de la première lentille (on appelle ainsi celle qui est du côté de l'objectif), *b*, centre optique de la deuxième, *ab* axe de l'oculaire, coïncidant avec l'axe *bx* de la lunette; *z*, axe d'un pinceau qui a été rendu convergent par l'objectif et dont tous les rayons iraient se réunir au point *t*, et y peindre l'image réelle du point correspondant de l'objet, si l'oculaire n'y était pas. La convergence de ce pinceau est augmentée par l'effet de la première lentille, et pour trouver le nouveau point de concours *p*, il suffit de tracer l'axe secondaire *at* et de déterminer *ap*, par la formule des lentilles, comme nous le verrons tout à l'heure. Ce point *p* doit se trouver au foyer principal de la seconde lentille, afin que le pinceau émergent soit rendu parallèle; ainsi, en menant l'axe secondaire *bp*, on aura la direction commune d'émergence, celle que tous les rayons du pinceau doivent prendre pour apporter à l'œil l'image du point de l'objet qui avait donné naissance au pinceau incident.

Le grossissement *g* de la lunette, munie de cet oculaire, se trouve de la manière suivante :

Soient φ la longueur focale de l'objectif, et *j* son centre optique, l'axe *tz* du pinceau incident irait passer au point *j*, et la grandeur de l'objet correspondante à l'image *tv* serait vue, comme *tv*, sous l'angle *tjv*, dont la tangente se tire du triangle rectangle *tjv*.

$$\text{tang}\, tjv = \frac{tv}{\varphi}.$$

Les triangles semblables *tav* et *pak* donnent d'ailleurs

$$tv = \frac{av.pk}{ak}, \quad \text{d'où} \quad \text{tang}\, tjv = \frac{av.pk}{ak.\varphi};$$

Digitized by Google

l'image réelle pk est vue par l'œil sous l'angle pbk, dont la tangente donnée par le triangle pbk est

$$\text{tang}\, pbk = \frac{pk}{bk}.$$

Le grossissement g étant le rapport de cette seconde tangente à la première, on a

$$g = \varphi \cdot \frac{ak}{av \,.\, bk}.$$

Soient maintenant f, f', les longueurs focales de la première et de la seconde lentille de l'oculaire, d la distance ab qui les sépare; la formule générale des lentilles,

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{f} - \frac{1}{b},$$

appliquée ici, fait voir que m est la distance ak de l'image à la lentille, que b est égal à $-av$, parce que les rayons incidents sont convergents et que leur point de concours t est derrière la lentille au lieu d'être en avant; on a donc

$$\frac{1}{ak} = \frac{1}{f} + \frac{1}{av};$$

on a d'ailleurs $f' = bk$ et $f' = d - ak$; au moyen de ces trois relations la valeur g du grossissement devient

$$g = \varphi \cdot \frac{f + f' - d}{ff'};$$

par conséquent le pouvoir amplifiant de cet oculaire est le même que celui d'une lentille simple dont la longueur focale x serait donnée par la relation

$$x = \frac{ff'}{f + f' - d}.$$

Cette longueur focale x caractérise une lentille qui est dite *équivalente* à l'oculaire négatif.

Voici maintenant les règles dont nous avons parlé pour les oculaires de cette espèce :

Digitized by Google

Longueur focale de la 1re lentille................	$=f.$
Id. de la 2e lentille................	$=\frac{f}{3}.$
Distance des deux lentilles.......................	$=\frac{2f}{3}.$
Ouverture de la 1re lentille......................	$=\frac{f}{2}.$
Id. de la 2e lentille......................	$=\frac{f}{6}.$
Id. du diaphragme......................	$=\frac{f}{3}.$
Distance de l'œilleton à la surface de la 2e lentille....	$=\frac{f}{18}.$
Ouverture de l'œilleton.........................	$=\frac{f}{9}.$
Distance de l'œil à la surface de la 2e lentille........	$=\frac{f}{6}.$

Tous ces éléments se déduisent donc de f, ou de la longueur focale du premier verre de l'oculaire ; celle-ci enfin se déduit de la longueur focale φ de l'objectif, et du grossissement g que l'on veut obtenir, par une condition indiquée par la pratique, et qui est

$$f=\frac{2\varphi}{g}.$$

Le tableau suivant contient les dimensions des quatre oculaires astronomiques, n° 1, n° 2, n° 3, n° 4 qui font partie des meilleures lunettes de grandeurs ordinaires, et les grossissements correspondants.

Longueurs focales de l'objectif en pouces.		20	30	42	48	54	60	72
N° 1, $f=2^p,25$.	Grossissements	»	»	»	»	48	54	64
N° 2, $f=1^p,50$	*id.*	»	»	54	64	72	80	96
N° 3, $f=1^p$	*id.*	40	60	84	96	108	120	144
N° 4, $f=0^p,666$	*id.*	60	90	126	144	162	180	216

Je suis porté à croire que ces règles ont été suivies pour les grandes lunettes de Munich, qui sont à Dorpat, à Poulkova, aux États-Unis et ailleurs, ainsi que pour les très-grandes lunettes de Cauchoix, savoir : celle de 18 pieds de M. South (objectif de 11 pouces $\frac{1}{2}$ de diamètre), et celle de 24 pieds de M. Cooper (objectif de 12 pouces $\frac{1}{2}$ de diamètre). Cette dernière est la plus grande des lunettes achromatiques que l'on soit parvenu à construire jusqu'à présent avec un plein succès, son

Digitized by Google

pouvoir amplifiant peut être porté à 1000; la grande lunette de Dorpat, exécutée par Frauenhofer, a 14 pieds de longueur focale (objectif 9 pouces de diamètre).

Ces règles de construction ne s'appliquent pas à l'oculaire positif de Ramsden, qui est représenté (Fig. 13); cependant les mêmes principes servent à tracer la marche des rayons et à trouver la longueur focale de la lentille simple équivalente au système des deux lentilles. En effet, la formule générale des lentilles

$$\frac{1}{m}=\frac{1}{f}-\frac{1}{b} \quad \text{donne} \quad m=\frac{bf}{b-f};$$

b est positif, puisque l'image se forme réellement en avant de l'oculaire; mais m est négatif, car il faut que b soit plus petit que f pour que les rayons de chaque pinceau puissent être parallèles entre eux au sortir du deuxième verre ; la valeur négative de m indique que l'effet du premier verre est de produire, en avant et du côté de l'objectif, une image virtuelle à la distance $-m$; il faut d'ailleurs que cette image se trouve au foyer principal du deuxième verre ; ainsi en appelant f' sa longueur focale, d la distance des deux verres, on a $f'=d-m$.

Soient h et h' les hauteurs des images réelles et virtuelles au-devant du premier verre, v et v' les angles visuels de la première, vue du centre de l'objectif, et de la seconde, vue du centre du deuxième verre, le grossissement g est exprimé par $\frac{v'}{v}$ ou par $\frac{\tan v'}{\tan v}$.

φ étant la longueur focale de l'objectif, on a

$$\tan v=\frac{h}{\varphi};\quad \frac{h}{h'}=-\frac{b}{m};\quad \tan v'=\frac{h'}{d-m};$$

d'où il résulte

$$g=\varphi\,.-\frac{m}{b}\cdot\frac{1}{d-m};$$

en transformant cette expression au moyen des relations

$$-\frac{m}{b}=\frac{f-m}{f};\quad m=f'-d,$$

on trouve

$$g=\varphi\,\frac{(f+f'-d)}{ff'};$$

d'où il suit que la longueur focale x de la lentille équivalente à l'oculaire est en effet

$$x = \frac{ff'}{f + f' - d}.$$

Pour discuter d'une manière générale les effets de cet oculaire à raison de la force relative des verres et de leur distance, on peut poser

$$f' = pf; \quad b = qf;$$

alors la formule $f' = d - m$ prend la forme

$$d = f\left(p - \frac{q}{1-q}\right),$$

dans laquelle q doit être plus petit que l'unité, et toujours assez petit pour que d soit positif.

Mais l'expérience a fait voir que les compensations d'achromatisme et d'aberration de sphéricité se font mieux lorsqu'on prend $p = 1$ et $d = \frac{2f}{3}$, c'est-à-dire, quand les deux verres ont la même force et qu'en même temps on les place à une distance égale aux deux tiers de la longueur focale qui leur est commune. C'est ainsi que la marche du pinceau a été tracée (Fig. 13), où t représente l'image réelle formée au-devant du premier verre, par conséquent p l'image virtuelle, bp la direction d'émergence.

124. Réticules et micromètres. — On appelle du nom général de micromètres tous les appareils disposés au foyer des lunettes astronomiques pour mesurer soit les diamètres des planètes, soit les distances et les positions relatives de deux étoiles voisines ou en général de deux points qui passent dans le champ de la lunette à des instants assez rapprochés. Les réticules sont les plus simples des micromètres, ils se forment avec des fils métalliques très-fins ou avec des fils d'araignées, tendus en travers dans une large ouverture pratiquée dans une feuille de métal mince et rigide. Cette sorte de diaphragme s'ajuste au foyer réel, c'est-à-dire, en dehors des oculaires positifs, et entre les deux verres des oculaires négatifs; alors les fils sont comme des axes de coordonnées, obliques ou rectangulaires, auxquels on rapporte les divers points de l'image. Cassini employait des fils qui se croisaient au centre du champ ou dans l'axe de la lunette; d'autres après lui les ont disposés en losange plus ou moins allongés pour laisser le centre toujours libre et visible; ces formes

Digitized by Google

ont été variées de diverses manières. Dans tous les cas, la lunette étant fixe dans le plan du méridien, et le réticule portant un fil horizontal et des fils verticaux, il suffit d'observer le temps qui s'écoule entre les deux instants où deux étoiles successives viennent passer devant le même fil vertical, pour qu'il soit facile d'en déduire leur distance angulaire ou leur différence en ascension droite; si la lunette est mobile ou dans le plan du méridien ou dans un autre plan, on conçoit que la détermination de leur distance angulaire, d'après les époques de passage, n'est qu'un simple problème de géométrie.

Mais dans une foule d'observations très-précises et très-délicates, il importe de mesurer directement la distance de deux étoiles, par exemple, et la position de la ligne qui les joint. Alors l'appareil devient plus compliqué, et il constitue alors le micromètre proprement dit. Le micromètre a reçu aussi des formes très-diverses; mais celui qui est représenté (Pl. 36, Fig. 4, 5, 6) donnera une idée suffisante du principe général de leur construction. (Fig. 4) Coupe horizontale suivant l'axe de la lunette supposée horizontale; (Fig. 5) coupe verticale qui fait voir l'intérieur; (Fig. 6) élévation qui fait voir le micromètre tel qu'il paraît à l'observateur placé près de l'oculaire. Ces figures sont empruntées à l'estimable traité du rév. Pearson, trésorier de la Société astronomique de Londres. Le micromètre se visse sur le bout du tube de la lunette au moyen de la douille taraudée *ab*, celle-ci fait corps avec un disque épais *cd* (Fig. 4, 6), dont la tranche est dentée pour recevoir la vis sans fin *ef*; dans cette partie fixe tourne une boîte circulaire *gh*, qui porte les deux montants *i* (Fig. 6) de la vis sans fin; ainsi c'est la vis qui se déplace, emportant la boîte *gh* dans sa rotation. Au travers de cette boîte, faisant corps avec elle, passe un cadre de métal *klmn*, dont les grands côtés *kl*, *mn*, sont, à l'intérieur, dressés avec beaucoup de précision; il sert à la fois de guide et de support aux deux pièces mobiles *o*, *p*, dont l'intérieur est évidé comme l'indique la figure 5, pour former le champ de vision; chacune porte un fil très-fin, et ces deux fils *q*, *r*, bien parallèles entre eux, ne sont pas tout à fait dans le même plan, ils peuvent par conséquent être rapprochés au point d'avoir l'air de se confondre; le mouvement de translation qui les écarte ou les rapproche parallèlement se produit par les deux vis *s*, *t*, fixées, l'une à la pièce *o*, l'autre à la pièce *p*; en tour-

Digitized by Google

nant les écrous s', t' qui portent des cercles divisés avec soin, on écarte les fils d'une quantité connue à moins d'un centième de millimètre. C'est ainsi que l'on obtient en quelque sorte un compas d'épaisseur excessivement délicat, que l'on peut ajuster dans le champ de vision, et que l'on porte dans la direction voulue en tournant convenablement la vis sans fin f (Fig. 6). Les vis doivent être d'une parfaite exactitude, et des ressorts u et v pressent constamment les pièces mobiles o et p, pour empêcher le temps perdu des pas de vis, dans leur écrou.

L'oculaire négatif xy se met au point de vision distincte en s'enfonçant un peu plus ou un peu moins dans la douille cylindrique qui le reçoit et qui fait corps avec la boîte gh.

Je regrette que le travail des grands objectifs soit d'une telle nature qu'il me soit impossible d'en parler ici et de donner seulement une idée des difficultés qu'il présente.

Quant à la disposition que l'on donne à ces grands appareils pour avoir la possibilité de les diriger aisément sur le point du ciel que l'on veut observer, j'ai essayé de la faire comprendre par un exemple (Pl. 36, Fig. 15), en donnant l'aspect général du pied que Cauchoix avait imaginé pour monter ses grandes lunettes, celle de 18 pieds pesant près de 100 kilogrammes, et celle de 24 pieds pesant plus de 150 kilogrammes. La lunette, équilibrée et fixée sur son support immédiat, se meut latéralement par un bouton a monté sur l'axe d'un pignon qui engrène dans l'arc denté b; en tournant ce bouton, le pignon roule dans la denture et emporte à droite ou à gauche la lunette et son support, car celui-ci ne tient à la pièce c que par une sorte de cheville ouvrière. Le mouvement vertical s'imprime au moyen des deux manivelles m, dont l'axe porte une petite roue qui engrène dans une roue beaucoup plus grande; les deux extrémités de l'axe de celle-ci font marcher deux chaînes qui, par une série de poulies de renvoi, vont s'attacher à une pièce solide d glissant sur le plan incliné ef; par ce mouvement les deux grandes pièces g et h en forme de V, articulées à leur point de rencontre k et à leurs extrémités, s'ouvrent ou se ferment, et font ainsi descendre ou monter la lunette.

125. Lunettes terrestres. — Pour les observations terrestres, il importe que les images ne soient pas renversées, et on les redresse en composant l'oculaire de quatre verres convergents convenablement disposés (Pl. 35, Fig. 19). La première image se

Digitized by Google

forme alors en dehors de l'oculaire en tt', mais sans changer sensiblement de grandeur, elle se trouve renversée de nouveau en rr' par l'effet des verres nos 1, 2 et 3. Les rayons suivent la marche qui est indiquée sur la figure; il y a en d', au point de croisement, un premier diaphragme d'une ouverture déterminée, qui arrête les rayons des bords de l'image, pour lesquels le système des verres ne corrigerait pas suffisamment les aberrations de sphéricité et de réfrangibilité. Au sortir du verre n° les pinceaux se réunissent de nouveau, pour former une image redressée dans le diaphragme d qui limite définitivement le champ de vision; c'est cette image réelle que l'on regarde avec le dernier verre n° 4. On comprend toutefois que l'achromatisme de l'objectif serait détruit, si par une heureuse combinaison des courbures des quatre verres nos 1, 2, 3, 4 on ne parvenait pas à le conserver.

126. Mesure du grossissement. — Les grossissements de la lunette de Galilée et de la lunette astronomique peuvent, comme nous l'avons vu, se déduire de la connaissance des distances focales principales des lentilles qui composent ces instruments; mais, ces distances focales étant elles-mêmes soumises à quelques incertitudes, à cause des épaisseurs des lentilles, on a cherché d'autres procédés directs pour déterminer le grossissement. Parmi ces procédés, il y en a d'assez simples : cependant, je me bornerai à indiquer ici un moyen nouveau dont je me suis servi depuis quelques années, et qui me semble à la fois très-simple et très-rigoureux. Je place à 50 ou 60 mètres une règle portant des divisions blanches et noires, sur lesquelles je dirige la lunette; au-devant de l'oculaire est adapté obliquement, à 45° par exemple, un petit miroir métallique m percé d'un trou de deux millimètres (Pl. 35, Fig. 20); à côté, se trouve un second miroir m' parallèle au premier : alors, par le trou du miroir m, on voit dans la lunette l'image amplifiée de la règle; par réflexion sur le miroir m' et sur les bords du trou du miroir m, on voit son image naturelle. Il reste à faire coïncider ces images et à reconnaître combien une division amplifiée couvre de divisions naturelles : ce nombre, qui se lit avec la plus grande facilité, est le grossissement de la lunette.

L'échelle divisée est peinte sur le côté nord de la grande entrée du Conservatoire des Arts et Métiers, par le jardin.

CHAPITRE VI.

Observations microscopiques.

127. Le microscope, surtout dans ces dernières années, a conduit à de si belles découvertes sur la structure des corps organiques ou inorganiques, qu'il m'a semblé nécessaire de donner au moins une idée de ces nouvelles conquêtes de la science. C'est ce que j'essaye de faire dans ce chapitre, qui se termine par la description de la planche 37.

M. le docteur Mandl, qui occupe un rang éminent parmi les plus habiles micrographes de notre époque, et qui n'est pas moins connu par ses découvertes que par son érudition, a bien voulu se charger de composer lui-même cette planche, en choisissant les figures les plus correctes, soit parmi celles qui ont été publiées par divers auteurs français ou étrangers, soit parmi celles qui résultent de ses propres observations inédites ou extraites de ses ouvrages. Il avait eu l'extrême obligeance d'y joindre une ample description que j'ai malheureusement été obligé d'abréger un peu pour rester dans le cadre de cet ouvrage ; mais j'ai essayé du moins d'en conserver le caractère spécial. Cette description, qui a aussi pour objet de préparer aux recherches microscopiques les jeunes gens qui n'en auraient pas encore l'habitude, est divisée en 8 paragraphes :

§ 1. *Expériences préparatoires et illusions.*
§ 2. *Test-objets.*
§ 3. *Cristallisations.*
§ 4. *Tissus végétaux.*
§ 5. *Épiphytes.*
§ 6. *Infusoires.*
§ 7. *Parasites.*
§ 8. *Liquides et tissus organiques.*

J'ai espéré que ces divers spécimens fidèlement représentés pourraient être de quelque secours à ceux qui débutent dans ce genre d'observations, dont les commencements surtout ne sont pas sans difficulté.

Digitized by Google

§ 1. *Expériences préparatoires et illusions.*

128. La vision microscopique diffère à quelques égards de la vision naturelle ; l'œil a besoin d'un certain exercice pour voir avec une netteté parfaite au moyen des pinceaux déliés qui émanent des divers points de l'objet et dont la divergence a reçu de si grandes modifications dans l'objectif et dans l'oculaire du microscope. Il faut donc commencer par de faibles grossissements et regarder de préférence des corps opaques à surfaces régulières, comme les lettres d'une pièce de monnaie, les traits d'une effigie, la surface d'un élytre ou d'une écorce. Ensuite, avec des grossissements un peu plus forts, on pourra essayer des objets transparents, placés entre deux verres minces et parallèles, soit à sec, soit avec de l'eau, en s'appliquant surtout à bien étudier l'influence de l'éclairage, qui joue un si grand rôle pour l'aspect et pour la netteté des images. Il sera bon toutefois de ne pas dépasser encore des grossissements de 100 diamètres. Après ces premiers exercices, quand l'œil aura acquis une habitude suffisante, quand il sera parvenu à voir sans fatigue avec une netteté comparable à celle de la vision distincte, on pourra soi-même préparer divers objets d'après les règles exposées dans les traités spéciaux (*Traité pratique du microscope*, etc., par le docteur Mandl, Paris, 1838). Mais il sera nécessaire de se rendre compte en même temps d'une foule de petits détails, de petites causes accidentelles produisant quelquefois des illusions singulières qui ont trompé plus d'un observateur.

Les lentilles de l'objectif et de l'oculaire doivent être nettoyées et essuyées avec des soins infinis ; la moindre trace de graisse ou de liquide, le moindre grain de poussière suffisent souvent pour faire paraître sur l'image des ombres ou des taches qui semblent lui appartenir. Le seul souffle de l'haleine condensée sur l'une ou l'autre de ces lentilles peut, pendant longtemps, déformer les images et troubler les observations.

Il en est de même des fibres de lin ou de coton, presque imperceptibles à l'œil nu, qui s'attachent aux lames de verre entre lesquelles on place les objets, ou des grains de poussière qui seraient flottants dans la goutte d'eau que l'on met entre ces lames pour mouiller l'objet et en augmenter la transparence.

Ces lames présentent par elles-mêmes des accidents d'une autre espèce : tantôt elles ont des raies ou des espèces de sillons

qui se croisent et se ramifient de diverses manières, tantôt elles sont incrustées de quelques parcelles d'émeri ou de rouge d'Angleterre qui restent adhérentes au fond des petites bulles imperceptibles où elles se sont logées pendant le travail des surfaces, et leur image s'allie quelquefois d'une étrange façon à celle de l'objet qu'on observe.

Les bulles d'air qui se forment près de l'objet, au milieu de la mince lame d'eau comprise entre les verres, méritent aussi une attention particulière. Pour étudier les diverses apparences qu'elles peuvent offrir, il suffit de prendre pour objet un peu de blanc d'œuf battu et mousseux; on aperçoit alors une foule de globules dont le centre est transparent comme du cristal, tandis que le bord est large, noirâtre, composé de deux anneaux distincts: on croirait aisément que chacun de ces globules est solide et entouré de deux enveloppes de teinte foncée (Fig. 1, *a*). Lorsque ensuite on presse les verres, ces bulles d'air comprimées deviennent des plaques irrégulières et granulées (Fig. 1, *b*), qui voilent la portion correspondante de l'objet, à tel point qu'elles ont été prises, par quelques observateurs, pour des taches de pigment.

Les anciens microscopes, à cause de l'imperfection de l'achromatisme, faisaient voir de petites franges colorées sur tous les contours des corpuscules. Alors, avec certains modes d'éclairage, et particulièrement avec la lumière solaire, ces contours frangés (Fig. 3) pouvaient être pris pour l'épaisseur d'une enveloppe; c'est ainsi, sans doute, que Mascagni, Fontana et plusieurs autres habiles observateurs ont été conduits à annoncer que les nerfs ou les vaisseaux lymphatiques entouraient toujours les derniers corpuscules organiques. Ces méprises sont bien moins à craindre avec les microscopes de nos bons constructeurs; cependant les meilleurs instruments pourraient encore induire en erreur celui qui n'aurait pas acquis l'habitude d'observer.

Enfin, un dernier genre d'illusion se trouve dans l'œil lui-même. Comme il faut l'approcher très-près de l'oculaire pour observer toute l'étendue du champ, il arrive que, par le mouvement des paupières, les cils se replient devant l'ouverture de la pupille, et l'on croit voir l'image traversée par de grandes barres noires; d'autres fois, ce sont les humeurs superficielles de l'œil qui font voir des espèces de cordons à nœuds ascendants ou descendants, par le clignement des paupières; d'autres fois encore on croit voir des mouches volantes (Fig. 2) qui résultent

Digitized by Google

probablement d'une petite congestion sanguine dans l'intérieur de certains vaisseaux qui ne contiennent d'ordinaire que des liquides transparents.

§ 2. *Test-objets.*

129. On est convenu d'appeler *test-objets* certaines préparations microscopiques qui ont été étudiées et dessinées avec soin par d'habiles observateurs munis d'excellents instruments; ces préparations, de structure délicate, sont devenues une sorte de criterium au moyen duquel on apprécie la puissance des microscopes; le meilleur instrument est celui qui montre, avec le plus de netteté et de précision, les détails les plus difficiles à apercevoir. Nous citerons seulement comme test-objets l'écaille de forbicine, l'écaille de papillon, l'écaille de sole.

Écaille de forbicine. — La forbicine, ou lespime, est un petit insecte qui habite les caves et les appartements humides; son corps est couvert d'écailles arrondies, réniformes, très-finement striées et composées d'une double membrane (Fig. 5, *a*). Un bon microscope doit non-seulement faire voir ces stries régulières, comme elles se montrent sur le dessin gravé, mais il doit faire distinguer les lignes, en partie superposées, de la membrane supérieure et de la membrane inférieure.

On trouverait des écailles analogues, et peut-être plus compliquées, sur plusieurs coléoptères, comme le hanneton bleu, et sans doute aussi sur plusieurs longicornes et xylophages.

Écaille de papillon. — Lorsqu'on touche une aile de papillon, il s'en détache une fine poussière qui ressemble à peu près à de la fleur de farine plus ou moins colorée. Le microscope fait voir que chaque grain de cette poussière est une écaille mince, allongée, portant des stries délicates et un pédicule par lequel elle s'implante dans le tissu de l'aile (Fig. 5, *b*); ces écaillles sont imbriquées, c'est-à-dire qu'elles sont par rangées alternes, se recouvrant en partie comme les tuiles d'un toit : la figure 4 représente, avec un faible grossissement, un fragment d'aile en partie dénudée, où se montrent les petites gaînes d'insertion. Ce fragment appartient à un papillon diurne (*pierris rapæ*).

Avec un grossissement de 400 ou 500 fois, on peut distinguer la double membrane de l'écaille d'un papillon diurne (*menelaus*, Fig. 5, *b*).

Digitized by Google

Une écaille plus déliée, dont la fine structure est encore plus difficile à apercevoir, est celle que l'on appelle *plumule* (Fig. 4, *b*), qui ne se trouve que sur certains individus; elle présente toujours à la partie inférieure deux lobes prolongés en arrière, entre lesquels, au milieu d'une profonde échancrure, prend naissance le pédicule long et grêle, terminé par un disque ou globule : la partie supérieure se termine en languette frangée, tantôt en forme de fer de lance, tantôt en forme de bandelette allongée.

Écaille de sole. — On avait toujours considéré les écailles de poisson comme un simple produit de sécrétion sans vitalité propre, mais M. le docteur Mandl en a fait l'analyse microscopique (*Voyage dans la Russie méridionale*, par M. Demidoff, Paris, 1839), et il a démontré que ces écailles ont une organisation remarquable, qu'elles sont composées de deux couches douées de propriétés différentes, l'une inférieure et fibreuse, l'autre supérieure, en partie cartilagineuse (Fig. 6); celle-ci est parcourue par des lignes concentriques dont les contours sont formés par des fusions de cellules. Il arrive souvent que le bord antérieur de l'écaille offre des espèces d'épines ou de dents qui, examinées au grossissement de 300 fois (Fig. 7), font voir une cavité intérieure, deux prolongements latéraux qui représentent la racine, un sac analogue au follicule dentaire, etc., etc.

Remarques. — On a souvent accordé aux test-objets plus de confiance qu'ils n'en méritent; tel microscope peut paraître excellent aux épreuves d'un test-objet, et cependant n'être que médiocre pour certains genres d'observations, et *vice versa*. Cela tient à un fait sur lequel on ne peut pas trop insister, savoir : que tel jeu de lentilles peut être parfait pour faire voir les objets secs, et se trouver fort médiocre lorsqu'il sera, par exemple, en présence d'objets transparents et imprégnés de liquide; ce n'est donc que par des observations comparatives sur des objets analogues que la supériorité d'un jeu de lentilles peut se manifester, et il faut, en général, varier la composition de l'instrument suivant la nature des expériences auxquelles on le destine.

§ 3. *Cristallisations.*

130. On sait que les plus fines parcelles des corps cristallisés ont des formes géométriques aussi régulières, aussi parfaites que

les formes plus volumineuses que l'on peut étudier à l'œil nu; mais ces cristaux rudimentaires, qui forment les gros cristaux en se juxtaposant d'après certaines lois, ne sont pas toujours faciles à observer comme objets microscopiques. On conçoit que la lumière doive éprouver des modifications très-complètes, soit en rasant leurs bords aigus, soit en traversant les assemblages prismatiques qui les constituent. Il importe d'autant plus de s'exercer à reconnaître ces formes diverses, qu'il arrive souvent que des cristaux apparaissent, ou dans les cellules, ou dans les tissus des corps organiques que l'on soumet à l'observation.

Ces expériences préparatoires peuvent se faire en laissant tomber sur une lame de verre une goutte un peu étalée d'une dissolution saline très-étendue; l'eau s'évapore lentement, les cristaux se forment et on les observe ensuite en disposant la lame de verre sur le porte-objet; mais l'expérience offre encore un bien plus vif intérêt, si, la lame de verre et la dissolution étant un peu tièdes, on s'amuse à suivre de l'œil le progrès de l'évaporation sur le porte-objet; alors, on peut saisir en quelque sorte la naissance des cristaux, on voit les molécules primitives à l'instant où elles se déposent à l'état solide, se groupant à la file, avec une vitesse prodigieuse, pour donner de longues ramifications cristallines.

La dissolution de sel ordinaire, chlorure de sodium, pourra servir de type pour les cristaux du système cubique, celles de phosphate ammoniaco-magnésien (Fig. 8, *a*), d'azotate ou de sulfate de potasse pour le système rhomboédrique, etc.

Le sel ammoniac (chlorhydrate d'ammoniaque) cristallise avec une grande facilité, et rien n'est plus curieux à voir que la symétrie merveilleuse avec laquelle se groupent ces lamelles cristallines en se déposant presque instantanément (Fig. 8, *b*).

Outre ces phénomènes de forme, il y a d'autres sels qui présentent les jeux de lumière les plus variés et les plus intéressants, par exemple, les iodures de mercure et de plomb, le succinate de cuivre et d'ammoniaque, l'oxalate de chrome et de potasse, etc., etc.

§ 4. *Tissus égétaux.*

151. Les diverses parties des plantes sont essentiellement formées d'un amas de cellules ou d'utricules à parois membraneuses distinctes (Fig. 13); ces parois prennent de l'épaisseur tantôt

Digitized by Google

par le dépôt de couches concentriques uniformes (Fig. 11), tantôt par un dépôt local (Fig. 9, 10). Certaines cellules ont aussi à l'intérieur un noyau (*nucleus*, *cytoblaste*) qui, pendant l'accroissement du végétal, subit des transformations très-variables.

Les plus grands végétaux ne présentent à l'œil qu'un petit nombre de parties distinctes, comme les radicelles, les racines, le bois, l'écorce, les feuilles, les fleurs, les fruits; il a fallu le secours du microscope pour faire l'anatomie de ces diverses parties qui nous frappent d'abord, parce que leurs éléments constitutifs n'ont que des dimensions excessivement petites et aussi parce que la série des transformations par lesquelles elles se développent progressivement s'accomplit dans des organes qu'il ne nous a pas été donné de saisir à la vue simple.

Ainsi les cellules microscopiques du tissu cellulaire sont en quelque sorte le foyer où s'élaborent les principales modifications que doit recevoir la plante pendant son accroissement. Ces cellules (Fig. 13), d'abord égales et uniformes, s'allongent et s'épaississent à l'intérieur pour former la fibre ligneuse, comme on le voit (Fig. 11) dans la coupe transversale du bois; elles s'allongent d'une autre manière par la destruction des cloisons intermédiaires pour former le tissu vasculaire; leurs parois se garnissent tantôt de fibres tournées en hélice pour former les trachées (Fig. 9), tantôt de points ou de stries pour produire les fausses trachées (Fig. 10), les vaisseaux ponctués, rayés, etc.

C'est aussi dans l'intérieur des cellules que se forment d'abord les grains de chlorophylle, de matières colorantes, de résine, les gouttelettes d'huile, etc., et surtout les grains de fécule, dont il importe de dire ici quelques mots.

La fécule (Fig. 12) présente de nombreuses variétés de forme et de grandeur, suivant l'âge des cellules et des grains, et suivant la nature de la plante qui l'a produite. Les grains de fécule du blé et du maïs sont en général arrondis et d'un petit diamètre qui dépasse rarement $\frac{1}{100}$ de millimètre; il y a plus de variété dans les grains de fécule de pomme de terre, qui ont ordinairement la forme représentée (Fig. 12) et dont quelques-uns presque triples des autres atteignent quelquefois, mais rarement, $\frac{1}{10}$ de millimètre dans leur plus grande dimension.

Digitized by Google

§ 5. *Épiphytes.*

132. Les moisissures, si connues de tout le monde, qui se développent sur les substances végétales ou animales ne sont que des espèces particulières d'épiphytes. On doit à Dutrochet cette observation importante que l'albumine ne peut pas éprouver la fermentation acide sans qu'il se développe en même temps une moisissure plus ou moins abondante.

On ne peut pas affirmer que toute fermentation, que toute altération des tissus végétaux ou animaux est accompagnée d'un développement d'épiphytes; mais les observations modernes ont fait connaître que ce phénomène se produit dans un grand nombre de cas; c'est ce que nous allons montrer par quelques-uns des exemples les plus frappants.

Levûre de bière, mère du vinaigre. — La levûre de bière n'est autre chose qu'un cryptogame (Fig. 16) qui se développe avec une étonnante rapidité pendant la fermentation alcoolique du liquide destiné à faire la bière, et qui devient apte, à son tour, à déterminer la fermentation dans la plupart des substances fermentescibles. Ce cryptogame se compose de cellules ovales dont la multiplication se fait par des bourgeons qui poussent sur les côtés.

La mère du vinaigre, qui est un produit de la fermentation acétique, est tout à fait analogue au ferment de la bière, elle détermine pareillement une prompte fermentation acétique dans le vin qui est mis en contact avec elle à une température convenable.

Maladie des pommes de terre. — Dans les pommes de terre malades, les feuilles, les tiges, et plus tard le tubercule lui-même (Fig. 14), se couvrent d'un cryptogame (*botrytis infestans*, Montagne); alors, les cellules qui contiennent la fécule sont frappées d'une espèce de gangrène; quand on les observe au microscope, on y remarque (Fig. 13, *b*) une très-fine poussière noirâtre; les grains de fécule diminuent de nombre et finissent par disparaître.

Maladie de la vigne. — Dans les vignes malades, les feuilles, les ceps, et surtout les grains se couvrent d'un cryptogame analogue, *oidium Tuckeri* (Fig. 15); la peau qui enveloppe le grain cesse de vivre et de se développer, tandis que le pepin, conti-

Digitized by Google

nuant à grossir, fait bientôt éclater son enveloppe, les liquides disparaissent, la grappe entière noircit, se racornit et se réduit presque à rien.

Muscardine, teigne. — Dans la maladie des vers à soie, connue sous le nom de muscardine, on remarque, comme incrusté dans le tissu même de la peau du ver, un champignon bien caractérisé (*botrytis bursiana*, B). Dans la plique polonaise on trouve un mycoderme; dans la teigne le *porrigo favosa* (Fig. 17); les plaques d'aspect pseudo-membraneux du muguet ne présentent que des éléments appartenant à un champignon et quelques lamelles épithéliales.

Les végétaux parasites se composent de filaments simples ou ramifiés, droits ou sinueux, renfermant souvent des cellules grandes ou petites. Tous se multiplient en proportion énorme par des spores en forme de petits grains transparents et arrondis (Fig. 14, *c*), dont les bords sont nets et bien marqués; leur plus grande dimension n'atteint presque jamais $\frac{1}{100}$ de millimètre. Ces spores se développent dans des tubes (Fig. 15, 14 *b*); comme ils résistent aux influences extérieures, souvent même à une température supérieure à 100°, et à l'action des acides les plus énergiques, ils peuvent être longtemps charriés par les gaz et les liquides, jusqu'à ce qu'ils trouvent un sol convenable à leur végétation.

§ 6. *Infusoires.*

133. Sous le nom d'infusoires on comprend une immense quantité d'animalcules ou de petits animaux invisibles à l'œil nu, dont les classifications ne sont ni moins nombreuses, ni moins variées que celles du monde visible; quant aux individus qui composent chaque genre ou chaque espèce, on peut dire qu'ils sont innombrables; car ils semblent être multipliés en raison inverse de leurs dimensions. Les premières observations sur ce point remontent à peu près à la découverte du microscope : on s'aperçut bientôt que les infusions de certaines plantes contenaient des animalcules infiniment petits, de formes très-différentes, ayant la force et l'agilité des poissons; de là le nom général sous lequel on désigne encore aujourd'hui cette multitude infinie d'êtres vivants et imperceptibles qui peuplent les eaux tranquilles de toutes les mares, de tous les lacs et de toutes les mers.

Digitized by Google

Nous citerons seulement, comme exemple, les monades (Fig. 19, *a*); les vibrions (Fig. 19, *b*); les colpodes (Fig. 19, *c*) et les vorticelles.

Un bocal ouvert et exposé à la lumière rempli d'une eau stagnante, avec quelques végétations locales, ne tardera pas à donner une multitude d'exemples de l'abondance et de la variété de ces êtres microscopiques. Une seule goutte de ce liquide, étalée sur une lame de verre et placée sur le porte-objet, fera voir en un instant l'agilité des monades, les rapides contractions des vibrions, des colpodes, des vorticelles, etc., etc.; c'est une organisation merveilleuse où l'on s'étonne de plus en plus de voir tant de force unie à tant de fragilité. Tous ces mouvements s'accomplissent par des mécanismes admirables qui diffèrent à tous égards de ce que nous voyons dans les reptiles et les poissons.

Les rotifères (Fig. 18) se distinguent doublement parmi ces êtres extraordinaires; ils semblent porter en avant deux roues dentées qui se meuvent avec une prodigieuse vitesse, excitant dans le liquide un tourbillon auquel ne résistent pas les monades qui viennent à passer dans le voisinage. Cette apparence de roues ou d'hélices, qui seraient mobiles sur un axe, ne peut pas être une réalité, elle est produite en effet par des cils fixés à deux lobes antérieurs et que le rotifère anime d'un mouvement conique excessivement rapide; de plus c'est un appareil qu'il replie au besoin; alors il se retire sur lui-même, quitte sa forme de fuseau allongé et prend celle d'un globule arrondi. C'est là sa première propriété distinctive. La seconde est peut-être encore plus étonnante; le rotifère mis à sec ressemble à un grain de poussière microscopique; il peut rester ainsi pendant fort longtemps; mais plongé de nouveau dans le liquide, il reprend toute sa force et toute son action mécanique. De très-habiles observateurs affirment qu'ils lui ont fait subir plusieurs fois et à de longs intervalles, ces alternatives de mort sans destruction et de vie nouvelle.

On assure que les anguillules (Fig. 19, *d*) et les tardigrades partagent avec lui cette propriété singulière.

Une belle découverte d'un très-haut degré d'intérêt, que l'on doit à M. Ehrenberg, a fait connaître qu'une foule d'infusoires, malgré leur organisation en apparence si frêle et si destructible, ont pu passer à l'état fossile et se conserver d'une

Digitized by Google

manière reconnaissable dans plusieurs couches géologiques d'époques et de formations différentes. Après tant de siècles, tant de catastrophes et de bouleversements qui ont broyé les mastodontes et toutes les organisations gigantesques de ces temps primitifs, on ne pouvait guère s'attendre à retrouver dans ces petits squelettes imperceptibles des infusoires, d'innombrables et très-fidèles témoins de ces grandes révolutions du globe. Grâce à cette découverte la science des êtres organisés et la connaissance des origines géologiques entrent en possession d'un élément nouveau qui pourra lever bien des doutes et substituer la vérité à bien des hypothèses.

Ce sont surtout les nombreuses espèces d'infusoires à carapace siliceuse ou calcaire qui se sont merveilleusement conservées et qui abondent dans certaines formations, par exemple dans les schistes à polir et dans la craie; la figure 20 représente le *gaillonella distans*, qui constitue la presque totalité de la masse du tripoli de Bilin, en Bohème; la figure 22 représente les navicules qui se trouvent dans la farine fossile de Franzensbad.

Quelques espèces cependant, quoique très-bien caractérisées, sont plus difficiles à classer; on ne sait trop si elles appartiennent au règne végétal ou au règne animal; telles sont les baccilariées ou diatomées (Fig. 21).

§ 7. *Parasites.*

134. Parmi les parasites nous citerons seulement la mite du fromage et l'acarus de la gale.

La mite du fromage est l'un des objets microscopiques les plus connus et les plus faciles à observer; ses dimensions sont assez grandes pour que l'on puisse l'apercevoir à la vue simple; mais le microscope est nécessaire pour étudier sa structure organique, ses mouvements et la force singulière dont elle est douée.

L'acarus de la gale est représentée (Fig. 23), d'après les dessins de M. Bourguignon, qui a fait les observations les plus intéressantes sur ce sujet. Cet animalcule se fixe sur la peau de l'homme à l'aide de ventouses situées à l'extrémité de ses pattes; il y creuse un sillon oblique et prolongé pour déposer des œufs qui se développent ensuite très-rapidement; de là le progrès quelquefois prodigieux de la maladie dont il est la cause.

Digitized by Google

§ 8. *Liquides et tissus organiques.*

135. Sang. — La circulation du sang est l'une des plus belles observations microscopiques et des plus instructives; elle se montre sans doute d'une manière beaucoup plus frappante avec le microscope solaire; mais, en choisissant bien les grossissements et le mode d'éclairage, on peut l'étudier plus soigneusement peut-être avec le microscope ordinaire, soit dans la langue, la patte ou le poumon de la grenouille, soit dans la queue du têtard, dans le poumon de la salamandre ou dans l'aile de la chauve-souris. Cette expérience est représentée dans la figure 24 où l'on a choisi les dernières ramifications des artères et des veines.

Si le sang était un liquide homogène, l'expérience précédente ne pourrait, en aucune façon, en montrer le mouvement; le sérum pur semblerait immobile malgré sa vitesse : mais les globules nombreux qu'il entraîne, accusent son passage et marquent sa direction. Il est facile de reconnaître que les globules, partie intégrante du sang, ne sont pas tous identiquement semblables; il y en a de plus gros et de plus petits, de plus colorés et de plus transparents; c'est surtout près des anses ou des étranglements qu'offrent parfois les capillaires où ils se meuvent, que l'on peut apprécier ces différences : là ils se pressent, ils se heurtent, ils s'arrêtent un instant, et il devient possible de les comparer les uns aux autres.

Cette comparaison cependant peut se faire d'une manière plus méthodique : il suffit pour cela de mettre sur le porte-objet une goutte de sang entre deux lames de verre. Alors, avec un grossissement de 200 ou 300 diamètres, on distingue les globules avec une telle netteté qu'il est facile d'en étudier la forme et d'en mesurer les dimensions. On avait reconnu que dans tous les mammifères, ils sont ronds, sensiblement sphériques, quoique de dimensions notablement différentes dans les différentes espèces (Fig. 25); mais M. Mandl a trouvé dans le genre chameau une exception remarquable. Ici les globules sont elliptiques (Fig. 27). Dans les autres classes, les globules ont, en général, d'autres formes plus ou moins ovoïdes ou elliptiques, comme on le voit par les exemples suivants : (Fig. 26), globules d'ovipares; (Fig. 28), de la poule; (Fig. 29), de la grenouille; (Fig. 30), de la salamandre.

Digitized by Google

Lait. — Le lait n'est pas non plus un liquide homogène ; lorsqu'on l'observe entre deux verres, comme nous l'avons indiqué tout à l'heure pour le sang, on y découvre aussi une foule de globules ronds et très-petits (Fig. 31), qui paraissent être, pour la plupart, des gouttelettes de graisse enveloppées d'une membrane particulière.

Mucus. — Le liquide sécrété par les membranes muqueuses contient, en général, des globules finement granulés (Fig. 32), pourvus d'une membrane et d'un noyau ; le mucus de la bouche contient souvent des lamelles épithéliales : M. le docteur Mandl a, de plus, observé ce fait curieux, que le tartre qui se dépose à la racine des dents, contient des vibrions et des baguettes (Fig. 33), et il est disposé à penser que ces animalcules pourraient être, dans leur genre, assimilés aux polypiers qui élèvent des montagnes dans la mer.

Fibre musculaire. — La fibre musculaire, toujours éminemment élastique et contractile, ne paraît pas varier beaucoup dans sa structure élémentaire (Fig. 34), mais elle prend des formes très-diverses. Ainsi, dans certains animaux, M. le docteur Mandl a vu la fibre présenter un aspect analogue à celui d'une trachée (Fig. 35) ; dans d'autres circonstances, elle semble formée d'anneaux ou de disques.

Cheveu. — Dans la tige du cheveu (Fig. 37) on distingue l'enveloppe corticale et la substance médullaire ; en général, dans cette dernière, on reconnaît des cellules qui sont quelquefois très-marquées, comme on le voit, par exemple, dans les moustaches du chien et dans le poil veule des rongeurs (Fig. 38, 39). Lorsque ces cellules sont desséchées et remplies d'air, on croit voir sous le microscope, un dépôt noirâtre à l'intérieur ; ce qui avait fait supposer qu'elles étaient des cellules pigmentaires : mais M. le docteur Mandl a fait voir que cette apparence est trompeuse, et que le pigment qui colore les cheveux et les poils se dépose dans la substance corticale elle-même, qui devient quelquefois excessivement mince. La figure 36 représente la racine ou le bulbe d'un poil de moustache de bœuf ; c'est un de ceux où les parties constitutives se montrent de la manière la plus distincte.

Peau. — Tissu adipeux. — Glandes sudoripares. — L'épithélium qui se forme sur les membranes muqueuses, et dont nous avons représenté les lamelles (Fig. 32, *b*), est la partie

Digitized by Google

la plus superficielle et prend le nom d'épiderme sur la peau ; il se compose de cellules à divers degrés de développement : la couche la plus inférieure est le réseau de Malpighi, formé de cellules très-jeunes, encore molles, et de couleur rougeâtre, dans lesquelles s'accomplit une rénovation continuelle. A mesure qu'elles se produisent à la surface inférieure, elles arrivent à la surface supérieure, où elles se transforment en lamelles dures et cornées qui se détachent et tombent successivement. Au-dessous du réseau de Malpighi est le derme proprement dit, dont l'épaisseur est variable et dont la structure fibreuse est élastique, serrée, résistante. Enfin, au-dessous du derme est le tissu adipeux (Fig. 41), dont les vésicules graisseuses sont, en quelque sorte, enlacées dans les lamelles extrêmement fines du tissu cellulaire. C'est dans ce tissu adipeux que se trouvent les glandes sudoripares (Fig. 40). Ainsi, le conduit excréteur doit traverser toute l'épaisseur du derme et de l'épiderme; c'est en effet ce qui arrive. Que ce conduit soit simple ou bifurqué à son origine, il s'élève en spirale plus ou moins allongée, comme l'indique la figure, et vient s'ouvrir à la surface extérieure de l'épiderme.

Pigments. — La plupart des tissus vivement colorés, comme l'iris, la choroïde, etc., etc., doivent leurs brillants reflets à des substances colorantes particulières que l'on comprend en général sous le nom de pigment. Il paraît que ces substances sont toujours élaborées et déposées dans des cellules spéciales de formes diverses que l'on appelle cellules pigmentaires (Fig. 42, 43, 44).

Nerfs. — Les nerfs se composent en général de filaments transparents (Fig. 45, *a*), à doubles contours, renfermant une substance molle. Cette structure est des plus altérables : sous le microscope, dans le cours d'une observation, on voit souvent l'enveloppe changer d'aspect, il se forme des plis, des étranglements et une sorte de coagulation intérieure (Fig. 45, *b*, *c*); quelquefois même des portions se détachent sous l'apparence de globules. Il est probable que cette désorganisation rapide se fait par l'influence du liquide dans lequel on place ces filets nerveux pour les observer.

M. le docteur Mandl a remarqué que les doubles contours ne se distinguent pas dans les filaments du grand sympathique, qui se trouvent ainsi analogues à ceux qui partent des corpuscules particuliers (Fig. 36) que présentent les ganglions.

Digitized by Google

Os. — Lorsqu'on observe au microscope les plus fines lamelles du tissu osseux (Fig. 47), on y distingue un vaisseau sanguin central, autour duquel se groupent une foule de canalicules formés par des lamelles concentriques; dans ces lamelles on distingue des corpuscules osseux étoilés et ramifiés. Cette apparence des derniers éléments du tissu des os rappelle de la manière la plus complète, la plus identique, ce qu'on observe à la vue simple dans un os ramolli par l'acide chlorhydrique étendu.

Dents. — La dent (Fig. 48) n'est qu'une variété du système général des os; les lignes sinueuses et parallèles dont le microscope montre les contours dans l'ivoire de la dent, sont dues en grande partie aux prolongements des corpuscules étoilés.

Poumons. — D'après les observations récentes de M. le docteur Mandl, la structure intime et élémentaire du poumon paraît se reproduire avec les mêmes caractères essentiels dans les animaux des différentes classes qui sont pourvus de cet organe. La figure 49, *a*, représente la coupe très-mince du poumon injecté d'un mammifère; c'est presque exactement l'apparence que l'on observe sur le poumon d'une grenouille, insufflé, séché et coupé longitudinalement; c'est-à-dire, une cavité dont la paroi donne naissance à une foule de petites cloisons incomplètes, ou adhérentes seulement par un de leurs bords. La figure 49, *b*, représente au contraire une portion du poumon de mammifère, prise sur le côté d'une cavité; et on y remarque un réseau de cellules polyédriques tout à fait analogue à celui que présente une lamelle très-mince du poumon de la grenouille détachée près de la surface. La figure 50 représente le réseau des capillaires sanguins qui viennent se ramifier et se replier sur les surfaces de ces cloisons, enveloppées de couches d'air que la respiration renouvelle avec plus ou moins d'activité; par là le sang est à la fois contenu et étalé en une multitude de nappes excessivement minces, dont l'étendue totale s'accroît prodigieusement dans les animaux des classes supérieures.

EXPLICATION DE LA PLANCHE 37.

136.— **1**. Bulles d'air; *a*, rondes; *b*, comprimées.—**2**, *a*, mouches volantes, *b*, filaments de l'œil. — **3**. Lignes irisées.

4. Aile de papillon; *a*, écaille commune; *b*, plumule; *c*, rangées de petits sacs où s'implante le pédicule des écailles. — **5**. Écailles; *a*, forbicine (*Lepisma saccharina*); *b*, *Morpho Menelaus*. — **6**. Écaille de la sole. — **7**. Dents de l'écaille (fig. 6, *a*), grossies 200 fois.

8. Cristaux; *a*, phosphate ammoniaco-magnésien; *b*, hydrochlorate d'ammoniaque.

9. Trachées ou vaisseaux spiraux de fougère. — **10**. Fausse trachée (vaisseau ponctué, rayé, etc.) du pin; grossie 500 fois. — **11**. Coupe transverse du bois de *Taxodium*, grossie 300 fois; *a*, fibres ligneuses à parois épaisses; *b*, rayon médullaire. — **12**. Grains de fécule de pomme de terre. — **13**. Parenchyme (tissu cellulaire) de la pomme de terre; *a*, cellules normales, remplies de grains de fécule; *b*, cellules gangrenées, la fécule diminue; *c*, cellules vides de fécule. — **14**. *Botrytis infestans*, Montagne; *a*, cellule d'épiderme de la feuille; *b*, réceptacle des spores; grossis 400 fois; *c*, spores. — **15**. *Oidium Tuckeri*. — **16**. *Torula cerevisiæ*. — **17**. Champignon de la teigne.

18. Rotifère. — **19**. Infusoires; *a*, monades; *b*, vibrions; les points indiquent la marche du vibrion; *c*, colpode; *d*, vibrions ou anguilles du vinaigre, de la colle de pâte.

20. *Gaillonella distans*, qui constitue la presque totalité de la masse du tripoli de Bilin, en Bohème. — **21**. Groupe de trois baccillaires, ou diatomées. — **22**. Navicules, *a*, vus en dessus; *b*, de côté.

23. Acarus de la gale.

24. Circulation du sang. — **25**. Globules du sang des mammifères; *a*, corpuscule sanguin; *b*, globule blanc; *c*, globules sanguins vus de côté; *d*, les mêmes, altérés. — **26**. Globules sanguins d'ovipares. — **27**. Du chameau. — **28**. De la poule. — **29**. De la grenouille. — **30**. De la salamandre. Tous ces globules elliptiques sont dessinés au même grossissement de 300 fois. On voit, dans la figure 26, des globules décolorés (*a*), et devenus ronds (*b*), par l'action de l'eau; on aperçoit en outre les globules blancs (*c*). Les globules d'abord peu apparents (*d*), deviennent plus tard très-distincts (*e*).

31. Lait; *a*, corps granuleux du colostrum. — **32**. Mucus, pris à la surface de la langue; *a*, globules de mucus; *b*, lamelles d'épithé-

Digitized by Google

lium. — **33**. Quelques-unes de ces lamelles, couvertes de granules, de vibrions et de baguettes.

34. Fibre musculaire. — **35**. La même, grossie 500 fois.

36. Bulbe d'un poil des moustaches du bœuf; *a*, le follicule; *b*, la seconde membrane, pourvue de vaisseaux et de nerfs; *c*, gaîne du poil. — **37**. Tige d'un cheveu; *a*, substance corticale; *b*, substance médullaire (canal); les cellules supérieures sont remplies d'air; *c*, épithélium. — **38**, **39**. Poils veules des rongeurs.

40. Glande sudoripare; *a*, la glande; *b*, *c*, conduit excréteur; *d*, tissu adipeux; *e*, derme; *f*, papilles; *g*, couche inférieure; *h*, couche supérieure de l'épiderme. — **41**. Tissu cellulaire et adipeux; *a*, faisceau de fibres du tissu cellulaire; *b*, lamelles amorphes; *c*, fibres isolées; *d*, vésicules adipeuses.

42. Fibres jaunes de l'iris du lézard. — **43**. Cellules pigmentaires. — **44**. Granules pigmentaires.

45. Fibres nerveuses du système cérébro-spinal; *a*, normales; *b*, *c*, altérées. — **46**. Corpuscules ganglionaires. — **47**. Os; *a*, canalicules; *b*, vaisseau capillaire; *c*, corpuscules osseux.

48. Coupe longitudinale d'une dent humaine; *a*, émail; *b*, substance osseuse; *c*, ivoire; *f*, corpuscules osseux.

49. Poumon de mammifère; *a*, cavité avec ses cloisons imparfaites; grossi 200 fois; *b*, une autre cavité, coupée sur le côté. — **50**. Vaisseaux capillaires qui se répandent sur les cloisons; grossis 400 fois.

Digitized by Google

CHAPITRE VII.

Phénomènes optiques de Physique céleste.

137. Il n'y a peut-être rien de plus grand, rien de plus admirable dans la science que la faculté qui nous a été donnée de voir les corps célestes; d'étudier leurs positions relatives, leurs mouvements, les distances si prodigieuses qui les séparent de nous; d'apprécier même, dans de certaines limites, le poids, le volume, l'état solide ou fluide et toute la constitution physique de la matière qui les constitue. Les corps terrestres nous sont connus par le concours simultané de tous nos sens; l'organe seul de la vue nous met en rapport avec les astres; leurs vibrations lumineuses, propagées au loin, viennent exciter les fibres de la rétine; c'est par ce seul point de notre sensibilité organique que nous pouvons les connaître; c'est par ces vibrations si restreintes, si petites, que nous pouvons sonder les profondeurs infinies de l'espace. On s'étonne d'abord qu'il soit possible d'arriver à quelque notion un peu certaine sur des êtres ou des corps qui sont placés tant en dehors de l'atteinte du toucher; mais, pour entrevoir cette possibilité, il suffit de considérer qu'en définitive l'intervalle qui nous en sépare, quelque grand qu'il soit, n'est en réalité qu'un grand voile de lumière.

Les bases fondamentales de la gravitation universelle furent posées par Keppler, d'après des observations faites à l'œil nu, sans autre artifice que l'emploi des pinnules ou des fils tendus pour fixer les alignements. Son génie avait ainsi résumé tout ce que la vision directe pouvait nous apprendre de considérable sur la structure du ciel; ce moyen d'observation était épuisé, il était parvenu à sa dernière limite. Mais, presque au même instant, au commencement du XVII[e] siècle, la découverte des lunettes vint ouvrir à l'astronomie une ère nouvelle : Galilée fit connaître, le premier, ce que l'on devait attendre de cette merveilleuse invention; informé, en 1610, qu'en Hollande il y a un instrument avec lequel on voit les objets éloignés comme s'ils étaient près, ce grand physicien se met à l'œuvre, travaille

Digitized by Google

des verres, les ajuste, les tourne vers le ciel, et quelques semaines après étonne le monde par l'éclat et la nouveauté de ses découvertes. On apprend, contrairement à toutes les idées qu'on avait pu se faire à cette époque, on apprend : qu'il y a des montagnes dans la lune, des taches sur le soleil; que Vénus a des phases qui prouvent sa rotation et celle de la terre; que Jupiter a des satellites tournant autour de lui, comme la lune autour de nous; que Saturne n'est pas un globe analogue à celui des autres planètes, mais qu'il est accompagné de deux ailes lumineuses symétriques et permanentes; c'est ainsi en effet que devait apparaître l'anneau, dans une lunette fabriquée sans règle, par les seules inspirations du génie, et qui grossissait à peine 30 fois. L'ouvrage qui annonçait ces découvertes, *Nuncius sidereus*, fut un grand événement, on comprit que la constitution des astres devenait enfin accessible à la science.

Deux siècles et demi se sont écoulés pendant lesquels on a perfectionné les instruments et multiplié les observations; ces grands travaux se rapportent en général à l'astronomie mathématique, qui a pour objet les mouvements des corps célestes, le calcul des orbites et des perturbations, en un mot, le système du monde considéré dans son ensemble et dans le jeu des forces qui en maintiennent l'harmonie. Cependant plusieurs résultats se rapportent aussi à l'astronomie physique, ou à la constitution des corps célestes, et à la *structure du ciel*, suivant l'expression de W. Herschel, le grand astronome qui a illustré deux siècles, la fin du XVIII[e] et le commencement du XIX[e]. Ces vérités ont un si grand intérêt, qu'il m'a semblé nécessaire d'essayer au moins d'en donner une idée dans ce chapitre, plutôt avec l'intention d'inspirer à mes lecteurs le goût de les étudier qu'avec l'espérance de pouvoir en si peu de mots satisfaire leur curiosité.

138. Taches du soleil. — En regardant directement la surface du soleil avec des verres noirs ou colorés pour atténuer à un point convenable son éclat éblouissant, on distingue quelquefois de petites taches sombres parfaitement limitées, de formes très-diverses, qui persistent pendant plusieurs jours, mais en changeant de place avec une certaine régularité. Il est rare cependant que ces taches du soleil occupent sur sa surface une étendue assez considérable pour être visible à l'œil nu; car il faut pour cela qu'elles sous-tendent un angle d'environ $\frac{1}{16}$ de l'angle visuel du disque solaire, et qu'elles aient en conséquence une largeur

Digitized by Google

absolue d'environ 10 ou 12 diamètres terrestres, puisque le diamètre du soleil est 112 fois aussi grand que celui de la terre. Mais, les télescopes, par leur pouvoir grossissant, nous permettent de distinguer des espaces beaucoup plus petit : nous font voir nettement des espaces angulaires qui ne s'élèvent pas à 1″; or 1″ est la 1920e partie de 32′, diamètre moyen du soleil, et correspond par conséquent sur cet astre à une grandeur absolue de $\frac{112}{1920} = 0,06$, c'est-à-dire 6 centièmes de diamètre terrestre, ce qui correspond à 764 kilomètres. Ainsi nous pouvons reconnaître sur le soleil des taches qui ont moins de 7 ou 800 kilomètres ou moins de 200 lieues d'étendue linéaire. Les verres colorés qui s'adaptent à l'oculaire pour faire ces observations, doivent être choisis avec soin; M. J. Herschel donne la préférence à un verre triple, composé d'un verre bleu de cobalt, compris entre deux verres verts; il recommande en même temps les grossissements de 100 à 180, suivant l'état de l'atmosphère, pour observer les détails des taches; des grossissements moindres donnent plus de champ et font mieux voir l'ensemble.

Il y a une autre méthode d'observation, qui offre de précieux avantages; elle ne donne aucune fatigue à la vue, elle fait voir les taches à un nombreux auditoire, et permet de les dessiner très-fidèlement. On obtient ces résultats en transformant la lunette en microscope solaire : l'image formée au foyer de l'objectif devient alors l'objet, l'oculaire fait l'office des lentilles du microscope, et les rayons émergents vont peindre sur un tableau l'image de l'objet, c'est-à-dire de l'image focale primitive.

A la vérité, le mouvement diurne, dont l'étendue est amplifiée dans la même proportion, déplace rapidement le disque solaire; mais par des mouvements combinés de l'axe de la lunette et du tableau lui-même on peut maintenir l'image très-fixe sur des repères marqués à cette fin; c'est alors qu'il est possible de tracer, sur le papier du tableau, la position des taches, leurs contours, les accidents si variés qu'elles présentent, et toutes les apparences qui se manifestent sur cette image amplifiée du soleil. Les fils micrométriques se peignent comme le reste, et forment un réseau de dimensions connues, qui sert d'échelle pour estimer les grandeurs absolues. En été, quand le soleil est très-élevé sur l'horizon, le tableau se trouve placé d'une manière peu commode pour dessiner, à moins que l'on n'opère dans un local disposé tout exprès; en m'occupant autrefois de recherches sur ce

Digitized by Google

sujet, j'avais voulu remédier à cet inconvénient, soit en dirigeant sur la lunette un faisceau réfléchi par l'héliostat, soit en plaçant des réflecteurs à l'oculaire; mais je m'aperçus bientôt qu'il fallait, pour conserver quelque pureté aux images, employer des réflecteurs beaucoup plus parfaits que ceux que j'avais sous la main. Au reste, la photographie sur papier fait disparaître aujourd'hui la plupart de ces difficultés; tout se réduit maintenant à rendre l'image immobile pendant un instant très-court, alors elle se peint d'elle-même avec une fidélité que la main la plus habile ne saurait atteindre. Cette invention promet de grandes découvertes dans la physique céleste, et particulièrement dans les phénomènes si extraordinaires qui se produisent sans cesse à la surface du soleil.

Nous avons représenté (Pl. 38, Fig. 2, 3, 4, 5, 6) quelques-unes des taches observées et dessinées par M. Herschel (*Traité d'Astronomie* et *Results of astr. obs. made during the years* 1834, 1835, 1836, 1837, 1838, *at the cape of Good-Hope*, etc. Londres, 1847). Les figures 2 et 3 appartiennent à des taches ayant leur *pénombre* très-complète; on appelle pénombre cette auréole d'un éclat intermédiaire, bien moins brillante que le reste du disque, mais bien plus lumineuse que le fond presque noir de la tache dont elle suit tous les contours. Il arrive souvent que des taches petites ou grandes, et de formes diverses, n'ont que des pénombres partielles; il arrive quelquefois que, tout en offrant des intensités très-différentes, elles ne font voir autour de leurs diverses parties aucune trace de pénombre qui se puisse distinguer nettement.

C'est ce que l'on voit sur la figure 4, où les contours des espaces noirs ne semblent aucunement reproduits par les portions environnantes, dont l'éclat cependant est assez semblable à celui des pénombres. Les fils du micromètre sont ici indiqués, ils sont distants de 2′, ce qui suffit pour faire juger tout de suite que l'ensemble de la tache occupe un espace de près de 5′ carrées. Or, 1′ carrée occupant sur le soleil un espace qui contient plus de 12 fois le carré construit sur le diamètre de la terre, il en résulte que cette tache contient en somme 60 fois le carré construit sur le diamètre de la terre, ou, en d'autres termes, que 60 globes de la terre mis à côté l'un de l'autre ne suffiraient pas pour la couvrir.

Que les taches soient avec pénombre ou sans pénombre, grandes ou petites, arrondies ou contournées, elles ont toujours

Digitized by Google

la double propriété d'être à la fois *persistantes* et *mobiles :* elles sont persistantes en ce sens qu'elles durent plusieurs jours, tantôt une semaine, tantôt quatre ou cinq semaines, rarement plus de six semaines; elles sont mobiles en ce qu'elles ne conservent pas la même apparence : on les voit d'un jour à l'autre et quelquefois d'un instant à l'autre, se déformer, se restreindre ou se ramifier de mille façons différentes. Lorsqu'on observe souvent la surface du soleil, il n'est pas rare de voir des taches à leur origine ou à leur fin : quand elles prennent naissance, elles grandissent par une rapide expansion; quand elles disparaissent, on remarque toujours que la pénombre se resserre d'abord, semble couvrir la portion noire et centrale pour ne disparaître qu'après elle. La vitesse de ces mouvements est facile à calculer d'après le changement des dimensions absolues, et l'on arrive ainsi à cette conclusion certaine, que d'immenses abîmes, capables d'engloutir 10 ou 20 fois le globe de la terre, s'ouvrent et se ferment si promptement que les fluides au sein desquels s'accomplissent ces phénomènes doivent se déplacer avec plus de vitesse que ne fait l'air dans nos plus violentes tempêtes atmosphériques.

Ces signes de mobilité et d'incessante agitation dans les masses volumineuses et profondes qui forment l'enveloppe visible du globe du soleil, ne sont pas les seuls que l'on y puisse apercevoir; on y distingue encore des *facules* et des *pores*.

Les facules sont des espèces de rubans de lumière plus éclatants que le fond sur lequel ils se développent tantôt en courbes largement ondulées, tantôt en courbes multiples et croisées comme des réseaux, imitant ainsi le sommet des grandes vagues de la mer quand elles peuvent se déployer sans obstacle. On les observe surtout près des bords des grandes taches, ou, si elles se montrent ailleurs, il arrive presque toujours que des taches ne tardent pas à se former dans leur voisinage; ce qui semble indiquer que les facules annoncent en effet des vagues immenses qui se forment avant que l'atmosphère lumineuse se déchire, pour nous laisser voir au fond de ces abîmes les couches plus sombres qu'elle enveloppe.

M. Herschel a donné le nom de pores à des points obscurs qui apparaissent en foule sur le disque du soleil, lorsqu'on l'observe avec de très-bons instruments. Il les compare à ce que l'on verrait en regardant d'en haut un vase plat de cristal, posé sur

Digitized by Google

un fond noir, dans lequel se ferait un précipité chimique; les flocons blancs du précipité flottant dans le liquide sont séparés par une multitude d'intervalles qui laissent voir le fond; intervalles dont la grandeur, la forme et la position changent sans cesse par l'agitation du liquide. C'est en effet quelque chose d'analogue que l'on observe dans l'image solaire, surtout quand elle est formée par projection sur le tableau de papier blanc : l'aspect général ne change pas, mais quand on regarde dans les détails, on voit comme des flots de lumière superposés, qui se croisent dans tous les sens et qui donnent au même point de la surface des éclats perpétuellement variables.

Le tableau suivant, dressé par M. Schwabe, comme résultat de ses observations persévérantes pendant dix-huit ans, donnera une juste idée du nombre des taches qui se produisent annuellement.

ANNÉES.	NOMBRE des jours d'observation.	NOMBRE des taches observées.	NOMBRE des jours sans taches.	ANNÉES.	NOMBRE des jours d'observation.	NOMBRE des taches observées.	NOMBRE des jours sans taches.
1826	277	118	22	1835	244	173	18
1827	273	161	2	1836	200	272	»
1828	282	225	»	1837	168	333	»
1829	244	199	»	1838	202	282	»
1830	217	190	1	1839	205	162	»
1831	239	149	3	1840	263	152	3
1832	270	84	49	1841	283	102	15
1833	267	33	139	1842	307	68	64
1834	273	51	120	1843	324	34	149

Ainsi, il arrive souvent que dans le cours d'une année il n'y a pas un seul jour sans taches, et, que dans les années les moins favorables à ces observations, M. Schwabe a trouvé des taches au moins de deux jours l'un.

La présence des taches a permis de constater que le soleil a un mouvement propre analogue au mouvement diurne de la terre, et de déterminer en même temps la période de ces révolutions et la direction de l'axe autour duquel elles s'accomplissent. La durée de la rotation du soleil est d'environ vingt-cinq jours; les observations les plus récentes sont celles de M. Laugier, qui donnent $25^j\ 8^h\ 10'$; s'il y a quelques heures de

différence entre les déterminations des divers observateurs, cela tient sans aucun doute à la mobilité des taches qui, en se déformant et en se déplaçant elles-mêmes, dérangent la fixité du repère qu'il faudrait avoir pour arriver à une mesure précise. Si l'axe de rotation du soleil était dans le plan de l'écliptique, dirigé, par exemple, suivant la ligne des équinoxes, nous verrions à cette époque, en mars et septembre, les taches décrire un cercle parfait; tandis qu'aux solstices, en juin et décembre, placés dans l'équateur solaire, nous les verrions se mouvoir en ligne droite; enfin dans les saisons intermédiaires le cercle des taches, vu plus ou moins obliquement, nous semblerait être une ellipse plus ou moins allongée. Si l'axe de rotation du soleil était perpendiculaire à l'écliptique, les taches se déplaceraient pour nous en ligne droite à toutes les époques de l'année. C'est donc par l'aspect des courbes qu'elles semblent décrire que l'on arrive à déterminer l'axe de rotation; cet axe fait avec l'écliptique un angle de 7° 19′ d'après les observations de Delambre, et la ligne des nœuds de l'équateur solaire fait avec la ligne des équinoxes un angle de 80° 45′. Ainsi, un peu avant les solstices, au commencement de juin et de décembre, les taches du soleil semblent se mouvoir en ligne droite, et c'est un peu avant les équinoxes, au commencement de mars et de septembre que leur trace prend l'aspect de l'ellipse la moins allongée.

Un fait bien digne de remarque et constaté par toutes les observations, c'est que les taches ne se forment pas indifféremment sur toute l'étendue de la surface du soleil : elles ne paraissent point vers les pôles, et, ce qui est plus surprenant, elles ne paraissent que très-rarement sur l'équateur, où la puissance énorme de la force centrifuge devrait produire les perturbations les plus fréquentes et les plus considérables, elles semblent confinées dans deux zones symétriques et parallèles qui ne s'étendent pas au delà de 35° de part et d'autre de l'équateur, laissant entre elles un intervalle libre de plusieurs degrés de largeur, sur lequel elles ne paraissent presque jamais (Pl. 38, Fig. 7).

139. Lumière zodiacale. — Cassini a donné le nom de *lumière zodiacale* à un immense ellipsoïde assez aplati pour n'avoir qu'une forme lenticulaire aiguë et qui paraît éclairé d'une lumière diffuse comparable à celle d'une queue de comète peu éclatante. Dans nos climats la lumière zodiacale se montre

mois de mars et d'avril, après le coucher du soleil, et aux mois de septembre et d'octobre avant son lever; son apparence est celle d'un cône, ou plutôt d'un angle dont le sommet s'élève tantôt de 30, tantôt de 90° au-dessus de l'horizon, sa largeur au point le plus bas correspondant à un angle visuel variable de 10° à 30°; sa position semble indiquer que son plan moyen coïncide avec l'équateur du soleil; et, d'après sa hauteur au-dessus de l'horizon, elle appartiendrait à un ellipsoïde aplati, ayant pour centre le globe du soleil, et se développant dans l'équateur de cet astre jusqu'à une distance qui comprendrait les orbites de Mercure et de Vénus, peut-être même l'orbite de la Terre. Sous la zone torride la lumière zodiacale est plus éclatante que dans nos latitudes; ce qui ne dépend peut-être que de l'inégale transparence de notre atmosphère. On croit avoir remarqué qu'elle a pris récemment une intensité extraordinaire dans deux circonstances différentes : en 1843, pendant l'apparition de la comète dont la queue occupait dans le ciel une longueur de 50°; et dans les premiers mois de 1850, bien qu'il n'y eût alors aucune comète sur l'horizon.

140. Phénomènes observés pendant les éclipses totales de soleil. — Pendant les éclipses totales du 8 juillet 1842 et du 28 juillet 1851, les astronomes ont donné une attention particulière à deux phénomènes remarquables qui avaient déjà été signalés et décrits depuis plus d'un siècle; mais qui n'avaient pas alors toute l'importance qu'ils doivent avoir aujourd'hui, parce qu'ils se rattachent à des questions que les progrès de la science rendent chaque jour plus accessibles. Le premier de ces phénomènes est celui de la *couronne;* le second celui des *proéminences*.

La *couronne* est le champ de lumière qui environne encore le disque du soleil quand il est complétement caché par la lune; elle est représentée (Pl. 38, Fig. 1, 5); la figure 1 appartient à l'éclipse du 8 juillet 1842 (*Mém. de la Soc. astr. de Londres*, t. XV); la figure 5 appartient à l'éclipse du 28 juillet 1851 (mêmes *Mém.*, t. XXI). Les divers observateurs ne sont pas exactement d'accord sur quelques apparences de ce phénomène; savoir : sur l'étendue du champ de lumière, sur sa forme et sa couleur, sur son état de calme ou d'agitation; cependant tout le monde admet qu'il commence strictement au bord même du disque de la lune, et qu'à partir de là son intensité offre une

Digitized by Google

dégradation progressive ; tout le monde admet que son éclat plus ou moins vif peut bien être modifié par l'état de notre atmosphère, mais que la couronne elle-même a une origine et une cause indépendantes de la terre et de la lune.

Les points essentiels à examiner sont ceux qui semblent à l'abri de nos influences atmosphériques ; ce n'est donc ni l'étendue de la couronne, ni son intensité, ni sa couleur ; mais c'est surtout son état de calme ou d'agitation. M. Arago, en 1842, a signalé des aigrettes ou de longs jets de lumière, se propageant normalement et avec une grande vitesse, dans toute l'étendue du champ ; M. Airy, en 1851, n'a pas observé ces mouvements continuels, mais il a reconnu très-nettement la structure rayonnée, qui rappelle la *rose des vents*, comme il le dit lui-même, et comme l'indique la figure 5 qui est tirée de son mémoire ; d'autres observateurs cependant ont remarqué aussi en 1851 des coruscations, c'est-à-dire des jets rayonnants, analogues aux aigrettes de M. Arago (*Annuaire* 1846).

Les uns attribuent à la couronne une largeur presque égale au diamètre de la lune, les autres ne lui donnent qu'une largeur trois fois moindre ; mais en général, à la couleur près, la lumière qu'elle répand est, pour son intensité, comparable à celle de la lune.

Les *proéminences* observées en 1842 et en 1851 sont pareillement représentées sur les figures 1 et 5 ; ce sont des espèces de flammes colorées, généralement roses ou rouges qui se montrent sur la couronne près du limbe de la lune, tantôt isolées comme *c* (Fig. 5), tantôt paraissant s'appuyer sur le limbe lui-même, comme *a*, *b*, *d*, *e*, *f*. J'emprunte encore ici la figure et la description du savant astronome royal de l'Observatoire de Greenwich : un peu avant l'éclipse totale, le limbe de la lune et celui du soleil, formant un croissant très-étroit, donnaient l'un et l'autre une image parfaitement nette dans le télescope, dont le pouvoir grossissant était 34 ; la lumière du soleil, rasant les montagnes et les vallées de la lune, en dessinait le profil avec une grande pureté ; bientôt ces taches dentelées s'effacent l'une après l'autre très-rapidement, sans montrer aucune apparence du phénomène de division et de conglomération de lumière observé par M. Baily ; le disque du soleil est complétement couvert par celui de la lune ; presque aussitôt, M. Airy aperçoit les proéminences *a*, *b*, *c*, *d* ; la plus remarquable *a*, est courbée

comme l'indique la figure, ayant une hauteur de 4′ ou environ $\frac{1}{8}$ du diamètre de la lune, la concavité paraît blanche et le reste d'un très-beau rouge; *b* est hémisphérique et blanche, *d*, conique et rouge; *c* ressemble à un globe rouge, séparé du limbe par un intervalle égal à son diamètre; l'aspect de la couronne ne montrant dans cet intervalle rien qui se fasse remarquer. Après quelques instants, *d* disparaît, *e* se manifeste; ensuite M. Airy reconnaît la longue chaîne de proéminences *f*, à peu près dans la portion du limbe où le disque du soleil, toujours caché, devait commencer à reparaître.

A l'aspect de ces changements, dit M. Airy, il est impossible de ne pas sentir vivement la conviction que les proéminences appartiennent au soleil et aucunement à la lune.

La chaîne *f* paraît d'un rouge écarlate et beaucoup plus brillante que les autres proéminences qui, à l'exception de *d* qui a disparu, n'ont éprouvé aucune notable modification, si ce n'est peut-être quelque accroissement de hauteur.

Ce spectacle d'un intérêt si attachant avait duré 3′ 16″; les premiers rayons du disque solaire rasent le bord du limbe de la lune, et à l'instant la couronne et toutes les proéminences ont disparu.

M. Airy a fait ces observations à Hvaläs près de Gottenburg; elles sont confirmées d'une manière plus ou moins complète par la plupart des nombreux astronomes qui s'étaient rendus dans le Nord pour étudier tous les phénomènes de l'éclipse totale; plus de quinze ont observé la proéminence *a* et lui attribuent à peu près la même forme; plusieurs aussi ont reconnu la proéminence *c*, détachée du limbe de la lune.

C'est un sujet de recherche des plus intéressants pour les futures éclipses totales.

141. Apparence du globe de la lune. — Pour reconnaître le relief de la lune et sa forme sphérique, pour constater l'état solide de sa surface, ses montagnes et ses vallées, il suffit de l'observer avec une lunette n'ayant même qu'un faible pouvoir amplifiant. L'isolement de ce globe au milieu de l'espace excite d'abord la surprise; sa solidité faisant soupçonner sa pesanteur, on s'étonne qu'il ne tombe pas comme les corps terrestres. On dit que Newton encore très-jeune en fut profondément frappé et que cette impression devint comme la première origine de ses grandes découvertes sur le système du monde.

Digitized by Google

La distance moyenne de la lune étant de 60 rayons terrestres, l'angle visuel de 1″ correspond sur sa surface à 1846 mètres; ainsi avec des instruments d'un pouvoir amplifiant considérable, nous pouvons y distinguer des longueurs qui ne dépassent guère 1000 mètres ou plutôt des surfaces d'environ 1 kilomètre carré, ou 100 hectares. Mais il n'est pas nécessaire d'employer d'aussi forts grossissements pour voir avec une netteté parfaite les hautes montagnes qui s'élèvent sur le globe de la lune et les profondes vallées, de forme circulaire, qui en couvrent la surface. C'est surtout vers l'époque des *quadratures* que ces observations offrent le plus d'intérêt; alors, à cause de l'obliquité des rayons éclairants du soleil, il y a des ombres portées qui donnent beaucoup plus de relief aux parties saillantes : dans la portion visible de l'hémisphère éclairé, on distingue de grandes plages qui semblent parfaitement unies, et qui n'ont cependant ni le même éclat, ni la même couleur; les unes ont une teinte grise plus ou moins sombre, d'autres ont une nuance verdâtre qui est quelquefois très-prononcée. Au centre des vallées circulaires on voit ordinairement s'élever une sorte de colonne à sommet arrondi, dont la base semble étroite quand on la compare au diamètre de la vallée. Quand la ligne qui sépare l'hémisphère obscur de l'hémisphère éclairé, se présente sous une obliquité convenable, on la voit marquée de dentelures profondes; et çà et là on distingue de hautes sommités qui sont frappées par la lumière tandis que leur base est dans les ténèbres; ce phénomène est tout à fait analogue à celui que nous observons, au lever ou au coucher du soleil, sur les pics les plus élevés de nos montagnes; et il a tout à fait la même cause, si ce n'est que les pics des montagnes de la lune doivent avoir d'énormes dimensions pour être visibles à cette distance.

Plusieurs observateurs ont fait, à diverses époques, une étude approfondie et détaillée de tout ce que la science peut découvrir à la surface de la lune; parmi ces habiles *sélénographes*, M. Madler est le plus récent et l'un des plus habiles. Sa carte de la lune est plus complète et plus fidèle que celles de ses prédécesseurs; cependant lorsqu'on la compare aux meilleures cartes anciennes, comme celle d'Hevelius de 1647, on arrive à cette conclusion : que, depuis deux siècles, notre satellite n'a été le théâtre d'aucune grande catastrophe, d'aucun bouleversement

Digitized by Google

profond qui en ait modifié la surface d'une manière appréciable.

Les points les plus importants de la sélénographie se rapportent à la hauteur des montagnes, à l'étendue des vallées, à l'aspect du sol, et à la question de l'atmosphère de la lune.

Montagnes.— Nous pouvons mesurer la hauteur de nos montagnes avec une approximation de quelques décimètres; il n'en est pas de même des montagnes de la lune, puisqu'il faut d'excellents instruments pour y distinguer une étendue de 1000 mètres; cependant, par la mesure micrométrique de l'étendue des ombres, suivant les diverses obliquités des rayons solaires qui les produisent, on arrive au moins à une valeur approchée de la hauteur de leur sommet au-dessus du sol des vallées. M. Madler attribue une hauteur de 7259 mètres au pic le plus élevé de la lune, auquel il a donné le nom de Newton; et il a mesuré vingt autres montagnes dont la moins haute a encore 4340 mètres; sans compter une foule de chaînes ou de chaînons dont les pics ont plus de 2000 ou 3000 mètres.

Vallées.— Les vallées circulaires au centre desquelles s'élève une colonne ou un cône à pente abrupte, ont une telle ressemblance avec le cratère du Vésuve, et surtout avec les cratères des volcans éteints de l'Auvergne et des champs Phlégréens, qu'il paraît impossible de ne pas les considérer comme ayant été formées autrefois par des actions volcaniques analogues à celles de la terre, mais incomparablement plus puissantes. On les appelle donc des *cratères;* on en a fait le dénombrement; on a marqué leur place en longitude et en latitude lunaires; on leur a donné des noms pour les distinguer et les reconnaître. M. Madler a mesuré cent quarante-huit de ces cavités circulaires; le diamètre des plus larges atteint jusqu'à 240 kilomètres ou 60 lieues; leur profondeur est considérable, les bords sont à pic, et tout l'espace qui s'étend jusqu'au cône du centre, paraît être en général une vaste plaine de niveau. Ces cratères sont groupés par régions, de telle sorte que la lune semble aussi avoir ses terrains volcaniques et ses formations géologiques dues à des causes moins violentes.

Aspect du sol.— Les taches moins brillantes que l'on aperçoit à la vue simple, sur le disque de la lune, soit quand elle est pleine, soit quand elle est à diverses périodes de ses phases, ont été considérées comme des *mers*, dès les temps les plus anciens. L'invention des lunettes n'a aucunement justifié cette dénomi-

nation primitive; les observations les plus assidues, faites avec les instruments les plus puissants n'ont jamais rien pu découvrir sur la lune qui ressemble à une surface liquide tranquille ou agitée; une telle surface ferait l'office de miroir et serait facile à distinguer dans certaines positions, pour peu qu'elle ait quelques centaines d'hectares d'étendue. Cependant, l'on a conservé le nom de mers, pour désigner ces plages unies et en général moins resplendissantes; c'est ainsi que l'on trouve sur les cartes de la lune, *mare imbrium*, *mare nectaris*, *oceanus procellarum*, etc., etc. *Mare imbrium* est la plus sombre de toutes ces plages; *mare crisium*, celle qui semble avoir la teinte verdâtre la plus marquée.

On aperçoit dans quelques endroits des traces sinueuses et brillantes comme des fils d'argent; plusieurs observateurs ont été tentés de voir là des coulées de laves; ce n'est jusqu'à présent qu'une hypothèse.

On remarque ailleurs des fissures rayonnantes au nombre de quatre ou cinq, partant d'un même centre, que l'on serait tenté aussi de considérer comme produites par un effort souterrain qui aurait brisé la croûte superficielle, en la soulevant en forme de pyramide à très-large base.

Atmosphère. — Quelques observateurs, et en particulier M. Madler, inclinent à penser qu'il pourrait bien y avoir, autour du globe de la lune, une sorte d'atmosphère analogue à l'atmosphère terrestre. Cette opinion soulève de graves objections : premièrement on n'a jamais pu découvrir aucun nuage qui cache ou qui voile seulement quelques points de la surface; secondement, ni dans les éclipses de soleil, ni dans les *occultations* des étoiles, des planètes ou de leurs satellites, on n'a pu apercevoir les signes de déviation, de déformation et surtout de changement d'intensité qui devraient se manifester si la lumière de ces astres avait à traverser une atmosphère réfringente avant de raser les bords de la lune. Quelques astronomes, il est vrai, ont parfois remarqué que, dans les occultations, les étoiles semblent empiéter sur le disque de la lune pendant 2″ ou 3″ avant de se cacher derrière le limbe, mais, tout en admettant l'exactitude de leur observation, il importe de remarquer que ce phénomène est très-irrégulier; les uns l'aperçoivent, les autres ne l'aperçoivent pas, même quand les observations se font en même temps, au même lieu et avec des instruments pareils; pour ma part, je n'ai jamais

pu l'observer, l'occultation m'a toujours paru nette et instantanée ainsi que l'*émersion*. Il n'y a donc jusqu'à présent aucune preuve positive de l'existence d'une atmosphère lunaire ; mais il n'y a non plus aucune preuve qui empêche d'admettre que cette atmosphère existe, pourvu que l'on ajoute que sa transparence continuelle, sa faible hauteur, sa raréfaction, s'opposent à ce qu'elle se manifeste par aucun phénomène sensible.

142. Lumière cendrée. — Depuis la nouvelle lune jusqu'au premier quartier, la distance angulaire entre le soleil et la lune augmente jusqu'à environ 90° ; en même temps le croissant, d'abord très-délié, se développe de plus en plus jusqu'à devenir un demi-cercle. Durant cette période, un observateur qui serait sur l'hémisphère non éclairé de la lune, et sur un point quelconque de la région qui nous regarde, verrait certainement une portion plus ou moins considérable de l'hémisphère éclairé de la terre ; notre planète aurait pour lui ses phases décroissantes comme la lune a pour nous ses phases croissantes. Donc la terre éclaire alors une portion de l'hémisphère obscur de la lune, et, dans les circonstances favorables, cette lumière qu'elle y projette est assez forte pour que le disque entier de la lune devienne visible ; seulement, ce qui n'est éclairé que par la terre a peu d'éclat, c'est une *lumière cendrée* qui en dessine le contour et la surface d'une manière plus ou moins nette, suivant que les parties éclairantes de la terre renvoient vers la lune plus ou moins de lumière.

143. Apparence des planètes. — *Mercure* ne s'éloigne jamais assez du soleil pour qu'on le puisse bien observer, on constate seulement sa forme arrondie et ses phases variables.

Vénus est la plus éclatante des planètes, son diamètre est quelquefois de plus de 1′ ; cependant, malgré ces circonstances favorables, on ne peut jamais dans les meilleurs instruments en avoir une image satisfaisante. Son contour reste vague, mal défini ; sa surface paraît comme nuageuse, on n'y distingue rien de net, rien de parfaitement reconnaissable ; elle n'annonce pas quelque chose de solide comme la lune, mais plutôt quelque chose de vaporeux ; il reste donc beaucoup d'incertitude sur la durée de son mouvement de rotation autour de son axe.

Mars est représenté (Pl. 38, Fig. 18), tel que M. Herschel l'a dessiné en 1830, avec un télescope de 20 pieds. Son contour, quoique bien défini, paraît irrégulier et gibbeux ; les diverses régions de sa surface ont un éclat très-inégal, les unes sont d'un

Digitized by Google

rouge pâle de teinte ocreuse, les autres d'un gris verdâtre; à certaines époques on remarque près des pôles, comme l'indique la figure, de vastes contrées d'un blanc intense, mais leur étendue change avec la position de la planète à l'égard du soleil; on serait ainsi porté à supposer qu'elles ressemblent à de la neige ou à de la glace, qui fond pendant l'été de la planète et se reproduit pendant l'hiver. Mars n'a pas de satellite.

Jupiter est représenté (FIG. 19) tel que M. Herschel l'a dessiné en 1832 avec le même télescope de 20 pieds; son diamètre est plus de 11 fois celui de la terre (11,225), et son volume par conséquent plus de 1400 fois le volume de la terre (1414,2); malgré ses dimensions considérables, il fait sa révolution autour de son axe en $9^h\ 55'$; aussi, la grande force centrifuge qui en résulte lui donne un tel aplatissement, que le diamètre des pôles est à celui de l'équateur comme 100 est à 107; cette différence est sensible sur la figure. On aperçoit sur sa surface, dans la région équatoriale, des zones sombres et parallèles qui sont au moins au nombre de deux, l'une au nord, l'autre au sud de l'équateur; c'est ce que l'on appelle les *bandes* de Jupiter. Elles sont persistantes, cependant leur aspect change de temps à autre; il arrive assez souvent qu'elles se subdivisent ou se bifurquent obliquement (voy. la figure). D'autres fois, mais cela est plus rare, elles semblent se rompre et se disperser. C'est au moyen de la persistance des taches marquées sur les bandes que la durée de la révolution de la planète fut déterminée pour la première fois par Cassini, en 1665, et estimée à $9^h\ 56'$, nombre bien peu différent de $9^h\ 55'$, que l'on adopte aujourd'hui.

On remarque que les bandes sont moins sombres aux deux extrémités, dans le voisinage du limbe; cette circonstance est importante, elle semble indiquer, d'après M. Herschel, que la planète a une atmosphère d'une épaisseur considérable, réfléchissant plus de lumière que la surface solide elle-même, et que là où les bandes paraissent plus sombres, c'est le corps de la planète, comparativement noir qui devient en partie visible.

Jupiter a un diamètre qui varie de $30''$ à $46''$, suivant ses distances à la terre; on sait qu'il a quatre satellites, qui accomplissent leurs révolutions dans des plans peu inclinés sur son orbite, il en résulte qu'à chaque révolution ils s'éclipsent dans l'ombre de la planète; cependant le quatrième satellite, à raison

de sa distance plus grande, et de son inclinaison qui est aussi un peu plus grande, accomplit quelquefois ses révolutions sans pénétrer dans le vaste cône d'ombre. A chaque révolution ils passent aussi entre le soleil et l'hémisphère éclairé de la planète, alors leur opacité absolue devient évidente par le petit cercle noir qu'ils projettent sur le disque brillant de Jupiter.

Saturne est, sans contredit, la plus remarquable des trente ou quarante planètes qui composent maintenant notre système solaire; elle semble faite plus encore que les autres pour nous donner une idée des infinies merveilles du ciel; non pas par sa grandeur, puisque son diamètre est à peine dix fois plus grand que celui de notre planète, mais par l'admirable architecture qui la constitue, par le nombreux cortége des satellites qui l'accompagnent dans un ordre surprenant; et, surtout par ces anneaux concentriques, solides, immenses, moins épais que les Alpes, et vingt fois plus grands que la terre, qui, suspendus, isolés, se balancent autour du globe central. Quand nous pouvons observer cette planète, elle est neuf ou dix fois plus loin de nous que le soleil; c'est l'astre le plus éloigné de la terre où la puissance actuelle des télescopes nous fasse découvrir des preuves certaines de l'état solide de la matière constituante; car les preuves nous manquent pour Uranus, qui est à une distance double de Saturne, et à plus forte raison pour Neptune, qui est à une distance triple; nous ne savons rien de leur constitution physique parce que nous ne pouvons rien distinguer à la surface de leur disque, sinon l'amplitude qui nous permet de conclure que leur diamètre réel est environ quatre fois et demie le diamètre de la terre.

Les figures 20 et 21 (Pl. 38) représentent le globe et l'anneau de Saturne; la première est empruntée à M. Herschel, la seconde à M. Hind (*the Solar system*, etc., décembre 1851); nous les avons rapprochées à dessein, parce qu'elles font voir l'anneau dans des positions différentes et aussi parce que la figure de M. Hind, de vingt ans postérieure à celle de M. Herschel, représente les dernières et remarquables découvertes qui ont été faites durant cette période.

Donnons d'abord une idée de la structure et des dimensions de l'ensemble; la figure 20 montre le globe de Saturne et la perspective de l'anneau tel qu'il se présentait alors à l'observateur; on voit qu'il est composé de deux parties concentriques, situées dans le même plan et séparées par un petit intervalle qui

Digitized by Google

est indiqué par la ligne noire; l'une est l'*anneau extérieur*, l'autre l'*anneau intérieur;* ils sont parfaitement circulaires, c'est la perspective qui leur donne l'apparence elliptique. On appelle *largeur* de l'anneau la moitié de l'excès du diamètre extérieur sur le diamètre intérieur; ainsi la largeur de l'anneau extérieur semblerait, d'après la figure, être à peu près le tiers de celle de l'anneau intérieur, c'est dans le dessin primitif ou dans la gravure une incorrection (que j'ai reproduite), car les mesures anciennes, les mesures récentes et celles de M. Herschel lui-même, indiquent que la largeur de l'anneau extérieur est un peu plus de la moitié de celle de l'anneau intérieur; quant à l'*épaisseur* de l'anneau, elle n'est point indiquée, parce qu'elle est en effet trop petite pour être visible; on en a maintenant une double preuve, car il arrive tous les quinze ans à peu près que le plan de l'anneau coïncide avec celui de l'orbite de la terre, et qu'alors il est vu de champ; or, dans cette situation, en 1833 et en 1848 il n'a pas été possible de distinguer la moindre trace de l'anneau; l'ellipse brillante qu'il présentait à l'observateur quand il y avait encore assez d'obliquité s'est amincie de plus en plus, sans perdre de son éclat; elle est devenue presque une ligne droite, enfin l'image s'est évanouie malgré la puissance des meilleurs instruments.

Le tableau suivant contient les principales dimensions de l'anneau; il a été dressé par M. Hind d'après la discussion qu'il a faite des mesures micrométriques les plus exactes et les plus récentes.

	kilomètres.
Diamètre extérieur de l'anneau extérieur............	277 128
Id. intérieur de l'anneau extérieur...........	243 915
Largeur de l'anneau extérieur....................	16 607
Diamètre extérieur de l'anneau intérieur............	238 280
Id. intérieur de l'anneau intérieur............	184 313
Largeur de l'anneau intérieur....................	26 983
Intervalle des deux anneaux......................	2 817
Diamètre du globe de Saturne......................	124 340
Intervalle compris entre le globe et l'anneau intérieur.	29 986

La solidité de l'anneau résulte de sa forme nette, invariable et aussi de son opacité qui est démontrée par les ombres qu'il projette sur le disque de la planète; ombres que nous observons sous divers aspects, suivant l'obliquité de l'anneau sur l'éclipti-

Digitized by Google

que ; elles sont représentées dans la figure 20, ainsi que l'ombre portée par le globe sur l'anneau.

La figure 21 représente Saturne tel que M. Dawes l'a observé le 29 novembre 1850 ; on y voit les deux découvertes remarquables qui ont été faites dans ces derniers temps, savoir : la découverte de la séparation de l'anneau extérieur en deux parties, et la découverte d'un nouvel anneau sombre qui est compris entre le globe de Saturne et l'ancien anneau intérieur.

Plusieurs observations anciennes et modernes avaient déjà fait soupçonner une séparation dans l'anneau extérieur, mais ce fait sur lequel on conservait encore quelque incertitude, a été mis hors de doute en septembre 1843 par MM. Dawes et Lassel, avec un excellent télescope portant alors un grossissement de 450, et construit par M. Lassel lui-même ; c'est cette nouvelle division qui est figurée vers les deux extrémités du grand diamètre de l'ellipse, la moindre largeur est en dehors, elle est environ la moitié de la plus grande.

L'existence de l'anneau sombre avait pareillement été soupçonnée et ensuite indiquée d'une manière précise en 1838 par M. Galle, de Berlin ; mais en 1850, au mois de novembre, presque le même jour, M. Bond aux États-Unis et M. Dawes en Angleterre, ont fait des observations qui tranchent toute difficulté à ce sujet. La figure 21 représente la forme et les dimensions de ce nouvel appendice de Saturne, seulement M. Dawes y a remarqué une division à peine perceptible que le dessin ne montre pas. Ainsi en définitive Saturne a cinq anneaux dans le plan de son équateur : l'ancien anneau intérieur qui est comme la base de l'édifice, en dedans deux anneaux sombres et en dehors deux anneaux brillants.

Cette construction qui paraît si instable, si peu résistante, se maintient cependant depuis des siècles, emportée par une vitesse énorme dans l'orbite de la planète et retenue seulement par l'attraction mutuelle des pièces détachées qui la composent. Il est probable que les satellites, circulant à des distances variables, dans des plans peu inclinés sur celui des anneaux, jouent un rôle important dans cet équilibre ; on doit les considérer comme des contre-poids mobiles que les lois du mouvement portent où il faut pour empêcher que l'édifice ne s'écroule. On ne connaissait que sept de ces lunes de Saturne, mais une huitième a été découverte en 1848, le 18 septembre, presque en même

Digitized by Google

temps par M. Bond à l'Observatoire de Cambridge (États-Unis), et par M. Lassel dans son Observatoire privé, près de Liverpool, avec l'instrument précieux qui est son ouvrage et dont nous venons de parler plus haut.

Jusqu'à présent on n'a pu découvrir aucun élément de la constitution physique des autres planètes (voy. le tableau de la page 142); Uranus et Neptune sont trop loin; les trente-trois autres que l'on appelle *ultra-zodiacales* ou *extra-zodiacales*, ont des distances variables qui restent très-voisines de la demi-distance de Jupiter, mais elles sont trop petites.

144. Apparences des comètes (Pl. 38, Fig. 8, 9, 10). — Les comètes appartiennent à notre système, le soleil est le centre de leurs mouvements, comme il est le centre du mouvement de la terre et des planètes. Ces astres s'appelaient autrefois *astres errants* : à cause de l'irrégularité apparente de leur mouvement, qui les emporte d'une constellation à l'autre avec des vitesses souvent prodigieuses; à cause de leur courte durée, quelquefois comparable à celle d'un météore qui paraît subitement avec un vif éclat et qui s'évanouit dans l'espace après une course rapide. Newton a fait voir que malgré ces apparences les comètes sont soumises aussi aux lois rigoureuses de la gravitation universelle, qu'il n'y a rien d'irrégulier, rien d'imprévu dans la route qu'elles suivent : qu'après avoir observé un petit nombre de leurs positions sur la voûte céleste, on peut trouver leur distance au soleil et à la terre, calculer l'instant de leur passage au périhélie, tracer leur orbite et déterminer les vitesses différentes qu'elles doivent y prendre en chaque point. A l'époque même où Newton établissait théoriquement ces lois fondamentales, il put les confirmer par l'expérience sur la grande comète de 1680, l'une des plus extraordinaires qui se soient montrées et qui aurait été peut-être l'une des plus effrayantes si Newton n'eût pas marqué dans le ciel tous les points où elle devait paraître à un instant donné. Immédiatement après son passage au périhélie, cette comète, dans l'espace de deux jours, déploya un queue immense de 20 millions de lieues de longueur, sous-tendant dans le ciel un angle de plus de 50° qui, plus tard, après son développement complet, se montra avec une longueur de 40 millions de lieues; grande, par conséquent, comme la distance de la terre au soleil.

L'orbite de cette comète, calculée par Newton et exactement

confirmée par l'expérience, se trouva être une parabole, courbe infinie qui excluait toute idée de retour pour cet astre prodigieux; mais les principes posés admettaient les ellipses aussi bien que les autres sections coniques. Il y eut donc une grande ardeur parmi les astronomes, pour observer les comètes et pour chercher si dans le nombre il ne s'en trouverait pas qui eussent des orbites finies, et qui dussent par conséquent reparaître à des époques régulières et périodiques. Halley fut le premier qui eut la bonne fortune de trouver des orbites elliptiques; ayant calculé, d'après des observations anciennes, les courbes décrites par les comètes de 1531 et de 1607, il les rapprocha de la courbe décrite par la comète de 1682, et reconnut entre les éléments de telles ressemblances, qu'il n'hésita pas à regarder ces orbites comme appartenant à un même astre dont les retours devaient avoir lieu après chaque période de 75 ou 76 ans. Il osa donc prédire pour le commencement de 1759 le retour de la comète de 1682; cette prédiction fut accomplie; la comète reparut en effet le 12 mars 1759. Elle eut bien à subir, il est vrai, quelques perturbations de la part de Jupiter et de Saturne, et par suite quelques retards; mais Clairaut les avait prévus et calculés d'avance avec une exactitude très-étonnante pour cette époque. Cette comète conserve à juste titre le nom de *comète de Halley;* sa nouvelle période achevée, elle est revenue fidèlement en 1835; visible dans l'hémisphère austral avant de l'être dans notre hémisphère, elle a été observée par M. Herschel, au cap de Bonne-Espérance, pendant plusieurs mois. Les figures 9 et 10 (Pl. 38), qui la représentent, sont tirées de son ouvrage (*Results of astr. obs. made during the years* 1834, 1835, 1836, 1837, 1838, *at the cape of Good-Hope*, Londres, 1847). Les nouveaux éléments qui ont été recueillis dans cette dernière apparition, démontrent d'une manière plus décisive encore que c'est bien le même astre qui a été vu dès l'année 1305; les observations antérieures étant trop peu exactes pour que l'on puisse être sûr qu'elles s'appliquent, en effet, à la comète de Halley. En 1819, une seconde comète périodique a été découverte, par M. Encke, de Berlin; elle s'appelle *comète d'Encke*, ou *comète à courte période*, parce qu'en effet la durée de sa révolution n'est que de 1207 jours ou environ 3 ans et demi. Plusieurs autres, ayant des périodes diverses, ont été ensuite successivement découvertes et calculées, mais leur nom-

Digitized by Google

bre est bien petit, si on le compare au nombre total des comètes qui sont venues, depuis les temps les plus anciens, effrayer les différents peuples de la terre et exciter le zèle des astronomes et des géomètres. Les catalogues mentionnent 700 ou 800 apparitions, sur lesquelles on a calculé environ 150 orbites, et dans le nombre il n'y en a pas 10 qui appartiennent à des comètes périodiques.

La constitution physique de ces astres a un haut degré d'intérêt pour la science, soit à cause de leur nombre, soit à cause des phénomènes extraordinaires qu'ils nous présentent. La matière qui les compose est certainement analogue à celle qui constitue la terre et les planètes, puisqu'elle est soumise à la gravitation universelle; cela ne veut pas dire cependant qu'elle doivent contenir, à l'exclusion de tous autres, les éléments chimiques que nous connaissons ; car rien ne prouve jusqu'à présent que toute espèce de matière pondérable doive se trouver sur la terre, au moins en échantillon.

Les comètes ne sont point des corps lumineux, elles ne brillent que par la lumière du soleil, qu'elles renvoient, comme les planètes, avec d'autant plus d'abondance qu'elles sont plus voisines du périhélie; ainsi le soleil reste, dans le système dont il est le centre, le seul corps lumineux par lui-même.

D'après les dimensions de leurs queues, il est facile de voir que les comètes ont quelquefois des volumes qui surpassent énormément le globe du soleil, cependant leur masse est presque imperceptible; car elles reçoivent souvent de la part des planètes et surtout de Jupiter, des perturbations considérables qui changent profondément la forme de leurs orbites, mais dans ces actions mutuelles, c'est la comète seule qui obéit, du moins l'on n'aperçoit aucun dérangement sensible, ni dans la planète, ni même dans ses satellites, dont la masse est très-petite.

D'une autre part, elles sont tellement transparentes, qu'au travers des parties les plus brillantes de leur masse, qui sont sans doute les plus conglomérées, on aperçoit les étoiles les plus difficiles à voir; ainsi la brume atmosphérique la plus légère, la plus mince en hauteur, est moins transparente que le corps énorme d'une comète.

Ces astres, d'une matérialité incontestable, d'un volume prodigieux, presque sans masse et sans opacité, sont formés d'éléments qui n'ont rien d'analogue à la surface de la terre, si ce

Digitized by Google

n'est peut-être nos vapeurs les plus raréfiées, douées de quelques propriétés particulières, se rapprochant à quelques égards des propriétés peu connues que doit avoir l'air aux limites de l'atmosphère.

Ces faits une fois établis, la première question qui se présente sur leur constitution physique est celle de savoir si leur forme telle que nous la voyons, soit à la vue simple, soit au moyen de nos meilleurs instruments, est bien exactement celle de l'amas de matière qui les compose. Il est permis d'en douter : quand nous regardons le disque du soleil ou de la lune, nous voyons près du limbe que l'éclat s'éteint brusquement, et nous pouvons conclure avec certitude qu'il y a là une forme qui s'arrête. Nous ne pouvons pas affirmer, il est vrai, qu'au dehors de ces limites visibles, il n'y a ni vapeur, ni fluide, ni matière quelconque, mais seulement que de telles enveloppes, si elles existent, sont invisibles dans ces conditions. Si, tout à coup, dans d'autres conditions, ces atmosphères nous apparaissent, tantôt plus, tantôt moins, faudra-t-il conclure que le soleil et la lune ont changé de forme? non, assurément; il faudra conclure qu'autour du globe de ces astres il y a quelque chose qui, suivant les circonstances, devient visible ou invisible. Or, il n'y a rien dans les comètes qui ait une forme arrêtée : d'un instant à l'autre la queue paraît plus longue ou plus courte; par exemple, la figure 10 représente la comète de Halley telle que M. Herschel l'a vue en 1835, un soir pendant le crépuscule, et la figure 9 telle qu'il l'a vue quelques heures après. Qu'y a-t-il eu de changé dans l'intervalle? est-ce la forme ou la visibilité? assurément c'est la visibilité; et, dans le second cas même, on ne peut pas être sûr que tout ce qui constituait la comète est devenu visible; ainsi la figure 9 est moins incomplète que la figure 10, mais il est probable qu'elle ne représente pas la forme véritable de l'ensemble de l'astre.

Il me paraît donc certain que nous connaissons mal la forme des comètes et que les changements d'aspect qu'elles nous présentent doivent s'expliquer plutôt par des conditions particulières de visibilité que par des actions mécaniques violentes qui arrangeraient incessamment d'une autre façon la matière si raréfiée dont elles se composent.

Les comètes télescopiques, dont le nombre est très-considérable, sont presque toujours sans queues; elles ont une appa-

Digitized by Google

rence vaporeuse arrondie dont l'éclat indécis va s'éteignant vers les bords. Parmi les comètes visibles à l'œil nu, il y en a quelques-unes qui ont aussi cet aspect, seulement elles sont plus larges et plus brillantes; mais, en général, elles se montrent avec une ou plusieurs queues; on en a compté jusqu'à six étalées en éventail. Toutes les fois qu'on aperçoit une queue simple ou multiple qui s'évanouit, faute de lumière, à une distance plus ou moins grande, on distingue aussi à l'extrémité opposée ce qu'on appelle la *tête* de la comète (Pl. 38, Fig. 8, 9, 10). La figure 8 représente la comète de 1819, visible à l'œil nu; les figures 9 et 10 la comète de Halley, observée au télescope par M. Herschel. On voit que la tête se marque par un éclat plus vif, moins large et moins diffus, quelquefois on croit y distinguer une sorte de *noyau* plus brillant, d'autres fois une sorte d'enveloppe parabolique et transparente; aucune de ces formes n'est limitée d'une manière assez précise pour que l'on puisse avec certitude la considérer comme un centre principal d'attraction.

La queue est toujours opposée au soleil, c'est là un caractère constant; mais elle ne va pas toujours à la suite de la tête, comme on serait porté à le croire, il arrive parfois que dans le mouvement elle marche la première. On remarque aussi que dans certaines circonstances elle se courbe, que même elle semble éprouver une sorte de dislocation partielle ou totale.

Les comètes périodiques conduiront sans doute à la solution de quelques-uns des nombreux problèmes qui se rapportent à la constitution de ces astres; jusqu'à présent on a constaté seulement que l'éclat paraît moindre à chaque apparition nouvelle.

145. Des étoiles et de leur distance à la terre. — Le simple aspect de la voûte céleste, pendant une belle nuit, nous donne l'idée de la grandeur, de la magnificence, de l'ordre et de la stabilité : nous avons je ne sais quel sentiment de la distance incommensurable qui nous sépare des étoiles; nous admirons l'éclatante profusion avec laquelle elles sont répandues dans les profondeurs de l'espace; nous sommes étonnés de l'harmonie du mouvement qui emporte d'orient en occident cet ensemble infini, comme s'il n'était qu'un seul objet; enfin, nous reconnaissons bientôt que dans cette rotation universelle, chaque étoile semble conserver sa position invariable par rapport aux

étoiles sans nombre qui l'environnent. Aussi, les traditions de la plus haute antiquité nous apprennent que ces astres sont *fixes*, et ne peuvent être confondus avec les planètes et les comètes, *astres errants*, qui paraissent traverser les espaces stellaires.

On distingue les étoiles par leur *grandeur* : les plus brillantes sont dites de première grandeur, il y en a 15 ou 20 seulement; celles qui viennent ensuite, de deuxième grandeur; puis de troisième grandeur, etc., jusqu'à la sixième grandeur qui est à peu près le terme de ce qu'une vue ordinaire peut distinguer dans le ciel par une belle nuit très-obscure. Mais les lunettes font voir une foule d'étoiles que l'œil nu ne peut découvrir, et l'on continue ainsi cette division jusqu'à la dixième grandeur ou même jusqu'à la seizième grandeur. Cette classification, d'abord très-arbitraire, a été plus ou moins régularisée dans ces derniers temps.

Hipparque n'avait compté que 1022 étoiles dans la portion visible du ciel; Hevelius, le dernier des astronomes qui aient observé sans le secours des lunettes, en avait compté à Dantzig 1533.

M. Argelander, qui a dressé depuis peu le catalogue le plus complet, a compté, sur les huit dixièmes de la voûte céleste, 3256 étoiles visibles à l'œil nu; en ajoutant les 844 qui paraissent couvrir la zone de 54° autour du pôle arctique, on arrive à la somme totale de 4100 étoiles visibles, sans télescope, sur le ciel entier, pour une vue de portée moyenne.

Le tableau suivant (*Études d'astronomie stellaire*, de M. Struve, page 56) contient le nombre des étoiles de première, deuxième..., neuvième grandeur, comprises dans la zone de 30°, savoir — 15° et + 15° de déclinaison, divisée en 24 heures. Il résulte d'une discussion ayant pour base les propres observations de M. Struve et les observations antérieures de Bessel, Argelander, Piazzi, etc.

Digitized by Google

HEURES.	ÉTOILES de 1re à 9e.	HEURES.	ÉTOILES de 1re à 9e.	HEURES.	ÉTOILES de 1re à 9e.
I.	1516	IX.	1993	XVII.	2111
II.	1609	X.	1631	XVIII.	3229
III.	1547	XI.	1797	XIX	2751
IV.	2146	XII.	1604	XX.	2566
V.	2742	XIII.	1533	XXI.	1752
VI.	4422	XIV.	1766	XXII.	1652
VII.	3575	XV.	1896	XXIII.	1811
VIII.	2854	XVI.	1661	O.	2055
Somme totale...... 52 199					

Ainsi dans cette zone il y a plus de 52 000 étoiles en négligeant le nombre immense de celles qui ont un éclat moindre de celui de la neuvième grandeur.

On remarque une grande inégalité de distribution : la sixième heure, qui est la plus riche, en contient presque trois fois autant que les heures I, II, III, XII, XIII, qui sont les plus pauvres.

Si, au lieu de s'arrêter à la neuvième grandeur on compte toutes les étoiles visibles dans le télescope de 20 pieds de W. Herschel, on arrive, pour la zone dont il s'agit, au nombre de 6 millions et pour la sphère céleste entière au nombre de 20 millions.

Ces résultats font assez comprendre l'immense progrès que les lunettes, en moins de deux siècles, nous ont fait faire dans la connaissance du ciel.

Quant à la distance qui nous sépare des étoiles, nous n'avons qu'un seul moyen de l'explorer, c'est de chercher si les étoiles ont une *parallaxe;* c'est-à-dire, si elles éprouvent quelque déplacement sensible, quand on les observe à six mois de distance, ou des deux extrémités d'un diamètre de l'orbite de la terre. On a constaté d'abord qu'il n'y a aucune étoile parmi celles qui ont été observées, pour laquelle cette parallaxe s'élève seulement à 2", car les instruments la donneraient avec certitude; il en résulte que *les étoiles sont tellement reculées dans les profondeurs du ciel, qu'il n'y en a pas une dont la distance à la*

Digitized by Google

terre ne soit plus grande que 200 000 *fois la distance de la terre au soleil*. En effet, si des deux extrémités du diamètre de l'orbite de la terre, les deux rayons visuels dirigés à une étoile font entre eux un angle plus petit que 2″, c'est une preuve que ce diamètre, vu de l'étoile ne sous-tendrait pas 2″, et que le rayon de l'orbite, ou la distance de la terre au soleil, ne sous-tendrait pas 1″, donc l'étoile ou le sommet de cet angle est éloigné au moins de 200 000 fois la distance de la terre au soleil; car l'arc de 1″ est à peu près 200 000 fois plus petit que le rayon ou que sa distance au sommet de l'angle qu'il mesure.

Cependant des observations récentes, faites dans trois Observatoires de Russie, à Abo, à Dorpat et à Poulkova, et discutées par M. Struve, conduisent à ce résultat : que les étoiles de première grandeur ont une parallaxe de 0″,2 et qu'elles sont en conséquence à 986 000 ou approximativement à 1 million de fois la distance de la terre au soleil.

M. Struve, par d'autres considérations fondées sur la distribution des étoiles dans la sphère céleste, et sur leur nombre relatif, à raison de la grandeur à laquelle elles appartiennent, est conduit à cette autre conséquence : que les étoiles sont d'autant plus éloignées qu'elles ont moins d'éclat; celles de sixième grandeur, par exemple, les dernières visibles à l'œil nu, étant 8 fois plus éloignées que celles de première grandeur, et les dernières étoiles visibles au télescope de W. Herschel étant 225 fois plus éloignées; par conséquent à une distance de la terre égale à 225 millions de fois la distance de la terre au soleil.

On ne doit pas s'étonner que les étoiles, vues au télescope avec les grossissements les plus considérables, ne paraissent que comme des points lumineux, si déliés qu'ils n'ont aucun diamètre sensible; car si le soleil était 2 millions de fois plus loin de nous, il ne pourrait paraître, dans nos meilleurs instruments, que comme un point sans étendue. L'intensité de sa lumière serait alors $\frac{1}{2\,000\,000^2} = \frac{1}{4\,000\,000\,000\,000}$, et correspondrait à peu près à celle d'une étoile de huitième ou de neuvième grandeur; car, il résulte des expériences de Wollaston que l'intensité de la lumière de Sirius est $\frac{1}{20\,000\,000\,000}$ de celle du soleil; et l'on s'est efforcé de classer les étoiles de manière que l'intensité de l'étoile d'une certaine grandeur est $\frac{1}{2}$ de celle de la grandeur précédente; ainsi l'étoile de neuvième grandeur a une intensité $\frac{1}{2^8} = \frac{1}{256}$ de celle de Sirius qui est la plus éclatante des étoiles de première

Digitized by Google

grandeur, et par conséquent une intensité $\frac{1}{5\,120\,000\,000\,000}$ de celle du soleil, c'est-à-dire un peu plus faible que celle que prendrait pour nous le soleil transporté 2 millions de fois plus loin.

Nous devons signaler encore deux phénomènes remarquables, celui des *étoiles périodiques* et celui des *étoiles temporaires*. On appelle étoiles périodiques celles dont l'éclat augmente ou diminue suivant des périodes à peu près régulières; telle est, par exemple, *Algol* ou β de Persée. Son éclat ordinaire appartient à la deuxième grandeur; mais, de temps à autre, il diminue et se réduit à la quatrième grandeur dans l'espace de $3^h\frac{1}{2}$, puis il se relève aussi rapidement pour repasser à la deuxième grandeur, qu'il conserve sans altération pendant 2^j et 14^h. Ainsi sa période est d'environ $2^j\ 21^h$.

M. Arago, en appliquant à ces étoiles sa méthode polariscopique si remarquable, arrive à cette conclusion : que leur lumière a, par rapport à la polarisation, tous les caractères de la lumière solaire; ce qui confirme l'opinion que les étoiles sont des soleils et qu'il y en a dont la distance est telle qu'elle met plusieurs siècles pour se propager jusqu'à nous (*Annuaire* 1852).

M. Herschel donne le tableau suivant des étoiles périodiques.

ÉTOILES.	PÉRIODES. j.	h.	m.	VARIATIONS de grandeur.		PREMIERS OBSERVATEURS.	
β de Persée	2	20	48	2	à 4	Goodricke Palitzch	1782 1783
δ de Céphée	5	8	37	3,4	5	Goodricke	1784
β de la Lyre	6	9	»	3	4,5	Goodricke	1784
η d'Antinoüs	7	4	15	3,4	4,5	Pigott	1784
α d'Hercule	60	6	»	3	4	Herschel (W.)	1796
Anonyme du Serpent	180	»	»	7?	0	Harding	1826
o de la Baleine	334	21	»	2	0	Fabricius	1596
χ du Cygne	396	»	»	6	11	Kirch	1687
367 de l'Hydre (Bessel)	494	»	»	4	10	Maraldi	1704
34 du Cygne (Flamsted)	18 ans.			6	0	Janson	1600
420 du Lyon (Mayer)	Plusieurs années.			7	0	Koch	1782
x du Sagittaire				3	6	Halley	1676
ψ du Lyon				6	6	Montanari	1667

Si ces périodes étaient d'une régularité parfaite, on pourrait en chercher l'explication, mais elles offrent des intermittences ou des lacunes qui déconcertent tous les raisonnements que l'on a pu faire à ce sujet. Ainsi, o de la Baleine a disparu pendant 4 ans, et χ du Cygne pendant près de 3 ans, de 1699 à 1701.

Digitized by Google

Quant aux étoiles temporaires, on en cite seulement 5 ou 6, dont la plus récente parut inopinément en 1670 dans la tête du Cygne, avec un éclat de troisième grandeur, et s'éteignit ensuite après avoir brillé pendant quelques années d'un éclat très-variable; de 1604 à 1605 on vit aussi dans le Serpentaire une étoile non moins brillante que Sirius, qui a pareillement disparu sans retour. Les autres exemples sont plus anciens, il y en a même un qui remonte à 165 ans avant notre ère, et l'on rapporte que ce fut à cette occasion que Hipparque dressa son catalogue des étoiles visibles, premier inventaire du ciel que l'antiquité ait entrepris.

146. Étoiles doubles. — En 1803, William Herschel qui avait déjà fait tant de grandes découvertes dans le ciel, annonça au monde savant qu'il existe de nombreux systèmes formés de deux étoiles voisines, tournant l'une autour de l'autre dans des orbes réguliers, et accomplissant ainsi des révolutions périodiques analogues à celles de notre système planétaire. Une telle découverte ne pouvait pas être l'œuvre d'un jour, aussi l'illustre astronome n'y fut-il amené qu'après avoir observé, pendant vingt-cinq ans, les positions relatives et progressivement changeantes de plus de 50 de ces étoiles doubles. Depuis cette époque les observations se sont multipliées sur cette nouvelle branche de l'astronomie stellaire, qui a un si haut degré d'intérêt, et le catalogue des étoiles doubles s'est considérablement accru; mais, il s'en faut de beaucoup que dans tous ces groupes enregistrés, le caractère de la rotation périodique ait pu encore être constaté par des observations précises et suffisamment prolongées. La distance angulaire des deux étoiles de chaque système n'est en général que de quelques secondes, et il faut d'excellents instruments pour les séparer et pour prendre les mesures micrométriques de leurs positions relatives. Cependant il y a déjà un bon nombre de ces systèmes, pour lesquels on connaît la durée des révolutions : les plus courtes périodes sont de 40 à 50 ans, et les plus longues de celles qui sont calculées approximativement s'élèvent à 1200 ans; pour les autres un demi-siècle d'observations est trop peu de chose, il correspond à une portion de l'orbite trop restreinte pour que l'on puisse en calculer l'étendue avec une probabilité suffisante.

On sait qu'il y a des étoiles isolées dont la couleur tourne au jaune, à l'orangé, ou même au rouge vif; or, il arrive dans

Digitized by Google

la plupart des étoiles doubles que cette nuance appartient à l'étoile principale, tandis que la plus petite paraît bleue ou verte, soit qu'il y ait là un simple effet de contraste, soit que ces couleurs appartiennent réellement à chacun des astres.

Jusqu'à présent il ne paraît pas que l'on ait pu démêler avec certitude si ces systèmes binaires représentent deux soleils, lumineux par eux-mêmes, émettant chacun leur lumière propre, ou si l'un d'eux, analogue à nos planètes, ne brille que de la lumière qu'il reçoit de l'autre. Cependant la différence des intensités n'est pas assez grande pour que l'on puisse admettre aisément que l'un des deux astres ne brille que d'un éclat emprunté.

147. Nébuleuses. — Les nébuleuses se distinguent des étoiles par l'étendue vaguement limitée qu'elles occupent dans le ciel, et par une apparence de lumière diffuse qui les rend comparables à un morceau, plus ou moins grand, plus ou moins informe, détaché de la voie lactée. L'attention des astronomes fut particulièrement appelée sur ce sujet par le catalogue publié à Paris, en 1780, d'après les observations de Messier à Paris, et de Lacaille, au cap de Bonne-Espérance. On ne connaissait alors que 103 nébuleuses, tant pour l'hémisphère boréal que pour l'hémisphère austral. En peu d'années W. Herschel en ajouta plus de 2000, et dans le cours de ce siècle le nombre n'en a pas été grandement accru, si ce n'est par les découvertes que son illustre fils, sir J. Herschel, a été faire au cap de Bonne-Espérance pendant les années 1835 à 1839. Dans ces contrées où le pôle antarctique s'élève d'environ 34° au-dessus de l'horizon, et où Lacaille, près d'un siècle auparavant, avait aperçu dans son très-médiocre télescope 42 nébuleuses des plus remarquables, M. Herschel en a trouvé environ 1700, ce qui étend considérablement nos connaissances à ce sujet pour l'hémisphère austral, ou plutôt pour la région polaire antarctique.

Les nébuleuses nous apparaissent sous les formes les plus variées : les unes sont arrondies et ovales, à peu près comme des comètes sans queue ; d'autres, sans s'écarter beaucoup de cette forme générale, présentent à l'intérieur des régions plus lumineuses, contournées et arrondies de diverses façons ; d'autres s'allongent comme des ellipsoïdes presque lenticulaires, etc., etc. J'ai emprunté à l'ouvrage de M. Herschel (*Results of astronomical observations made during the years* 1834, 1835, 1836, 1837, 1838 *at the cape of Good-Hope*, Londres, 1847)

quelques-unes des figures les plus petites et les plus caractéristiques pour donner au moins une idée de ces apparences extraordinaires qui doivent désormais occuper une si grande place dans l'étude des mondes stellaires.

(Pl. 38, Fig. 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17.)

Fig. 11, nébuleuse d'une nature singulière, ovale bien défini, se distinguant des ovales ordinaires par une sorte d'axe vague, informe, courbé vers les bords et beaucoup plus lumineux que le reste.

Fig. 12, nébuleuse de forme annulaire, dont il y a deux exemples dans l'hémisphère boréal; son apparence est celle que présenterait une enveloppe sphérique composée de matière lumineuse, ayant peu d'épaisseur par rapport à son diamètre; l'anneau brillant correspondrait à l'épaisseur de l'enveloppe, et l'intérieur, qui se fait voir seulement par une faible lumière, accuserait, sous l'enveloppe, un globe vide ou transparent.

Fig. 13, nébuleuse ellipsoïde presque lenticulaire, dont le milieu semble se condenser de plus en plus et prendre une apparence sphéroïdale; il y a un grand nombre de nébuleuses offrant ce caractère.

Fig. 14, nébuleuse dont l'ensemble est un parallélogramme, accidenté de telle façon qu'il rappelle le profil d'un buste en silhouette.

Fig. 15, nébuleuse déjà observée par Lacaille dans le Centaure; elle est un des plus parfaits spécimens de ces nébuleuses ovales, larges et faibles, ayant à l'intérieur un noyau ovale, brillant, excessivement condensé, qui semble laisser voir à l'intérieur un grain arrondi.

Fig. 16, nébuleuse dont la tête arrondie et plus condensée que le reste laisse apercevoir un noyau qui est *résolvable* en étoile double par un fort grossissement; dans le vaste appendice qui l'accompagne en forme de faucille ou de large spiroïde, se trouvent dispersées d'autres petites étoiles. Elle se trouve près de η d'Argus, dans cette région, la plus riche de la voie lactée, où M. Herschel compte 5093 étoiles dans l'étendue d'un degré carré.

Fig. 17, nébuleuse, magnifique amas globulaire du Centaure, qui est au delà de toute comparaison le plus grand et le plus splendide objet de cette espèce qui ait été vu dans le ciel; dans un espace d'environ un quart de degré carré, les étoiles sont si amoncelées, si pressées, qu'elles sont littéralement innombrables.

Ces divers exemples appartiennent à des nébuleuses de petite étendue, ayant des formes bien caractérisées; mais il y a en grand nombre des nébuleuses qui occupent une partie considérable de la voûte céleste et dont les limites s'éteignent sans qu'on puisse en arrêter le contour. Elles sont alors comme un vaste ensemble dont la continuité se révèle par des linéaments de lumière qui deviennent çà et là plus denses ou plus transparents. Les recherches ultérieures nous apprendront peut-être s'il s'accomplit quelques mouvements ou quelques mutations dans ces mondes au delà desquels nos yeux ne peuvent plus rien voir aujourd'hui du grand spectacle de la création.

CHAPITRE VIII.

Des Interférences et de la Diffraction.

148. Hypothèses sur le mode d'existence de la lumière. — Nous avons pu exposer les lois générales de la réflexion, de la réfraction et de la décomposition de la lumière, en nous appuyant seulement sur l'expérience, sans qu'il fût besoin, pour les faire comprendre, de recourir à aucune considération théorique sur la nature de la lumière ou sur son mode d'existence. Cette méthode purement expérimentale ne peut plus s'appliquer avec la même simplicité aux phénomènes de diffraction, qui mettent en évidence des propriétés toutes nouvelles et si intimement liées à la théorie qu'il serait impossible de les présenter d'une manière claire et précise, sans avoir une idée générale du mode de mouvement qui constitue la lumière. Nous commencerons donc par rappeler en peu de mots les deux systèmes auxquels, dans tous les temps, les physiciens se sont arrêtés, savoir : le *système de l'émission* et le *système des vibrations ou des ondulations*.

Le système de l'émission suppose que la lumière se propage par un mouvement de *transmission* ou de *translation*, c'est-à-dire que les molécules lumineuses reçoivent des corps lumineux une impulsion qui les lance de toutes parts, comme de petits projectiles animés d'une prodigieuse vitesse. Ainsi, quand nous regardons le soleil, les molécules qui nous frappent seraient sorties de la substance propre de cet astre 8′ 13″ auparavant, et s'éloignant sans cesse d'un mouvement continu elles auraient, dans cet intervalle, franchi les 40 millions de lieues qui nous en séparent. Ces molécules auraient une existence matérielle indépendante du mouvement qui les anime; mais leur masse, infiniment petite, ne serait point soumise à l'action de la gravité, elle constituerait une matière différente de la matière pesante. La diversité des couleurs résulterait de la diversité des vitesses; la réflexion serait analogue à celle des corps élastiques; la réfraction supposerait : 1° que les milieux diaphanes laissent entre

Digitized by Google

leurs molécules pondérables des espaces assez grands pour que les molécules lumineuses pussent les traverser librement; 2° que les molécules pondérables exercent une puissance attractive qui, en se combinant avec les vitesses acquises, produit les déviations que l'on observe.

Le système des vibrations ou des ondulations suppose au contraire que la lumière se propage par un mouvement de vibration qui se communique de proche en proche avec une grande vitesse dans une substance impondérable que l'on nomme *éther*. Ainsi, dans cette hypothèse, la lumière est analogue au son, du moins dans ce sens que le son est un mouvement de vibration dans l'air ou en général dans la matière pondérable, tandis que la lumière est un mouvement de vibration dans la substance éthérée. Partout où le son se propage, il y a matière; partout où la lumière se propage, il y a de l'éther. Donc l'éther remplit l'espace, car il n'y a pas un point de l'espace qui ne soit accessible à la lumière : il se trouve entre le soleil et la terre, entre tous les corps de notre système planétaire, et dans l'espace indéfini qui nous sépare des étoiles les plus éloignées, car il n'y a pas un point de cette immense étendue qui ne soit à chaque instant traversé par d'innombrables rayons de lumière, et ce n'est pas seulement dans le vide des cieux que l'éther est répandu, mais il pénètre dans tous les corps, il remplit tous les intervalles que laissent entre eux les atomes pondérables. Si l'éther n'existait pas dans toute l'étendue de l'atmosphère, la lumière des astres n'arriverait pas jusqu'à nous; s'il n'existait pas dans l'eau, le verre, le diamant et tous les corps diaphanes, ces corps ne se laisseraient pas traverser par les ondes lumineuses, enfin, s'il n'existait pas dans les intervalles qui séparent les atomes de notre enveloppe matérielle, la lumière ne pourrait pas nous affecter, les ondulations ne passeraient pas dans les humeurs de l'œil, et jusqu'aux fibres nerveuses de la rétine, dernier terme visible où notre raison puisse les suivre. Les corps opaques eux-mêmes sont remplis d'éther, car ils deviennent transparents lorsqu'ils ont une ténuité suffisante.

Ainsi, le système des ondulations nous conduit à admettre l'existence d'une matière, ou plutôt d'une substance, au sein de laquelle se trouvent dispersés, suivant des lois éternelles, les divers fragments de matière pondérable qui constituent les planètes et les astres.

Cependant, si l'éther est partout, il n'est pas partout identique à lui-même. Il est probable que dans le vide des espaces célestes, comme dans le vide artificiel produit par nos machines, il n'y a nulle différence dans la distribution de cette substance, et par conséquent nulle différence dans la marche de la lumière. Mais, dans l'intérieur des corps, la lumière se meut diversement, les ondulations changent de vitesse et de longueur, et par conséquent l'éther prend des élasticités différentes. Nous verrons même par les expériences de polarisation, que, dans la plupart des corps cristallisés, son élasticité n'est pas la même dans tous les sens.

Si, dans toute son immense étendue, l'éther était en repos parfait, le monde entier serait dans les ténèbres; mais qu'il soit ébranlé dans quelques points, à l'instant la lumière jaillit et se propage indéfiniment de toutes parts; comme dans une atmosphère parfaitement tranquille, la simple vibration d'une corde fait naître un son qui se propage au loin suivant des lois déterminées. La lumière, qui est le mouvement, doit donc se distinguer de la substance éthérée elle-même dans laquelle le mouvement s'accomplit, comme le mouvement vibratoire qui constitue le son doit se distinguer de l'air, ou en général de la matière pondérable dans laquelle les vibrations s'accomplissent.

En parlant des ondes sonores, nous avons admis que le mouvement des molécules se fait dans le sens du rayon sonore, c'est-à-dire qu'elles s'éloignent et se rapprochent alternativement du centre d'ébranlement; mais nous devons considérer ici le mouvement de vibration d'une manière plus générale, et reconnaître que le déplacement des molécules ou des portions de l'éther peut tout aussi bien se faire perpendiculairement au rayon que dans le sens même du rayon. Ainsi, quand on allume une bougie dans les ténèbres, la lumière se propage dans un temps infiniment court, suivant la ligne qui va de la bougie à l'œil; mais rien n'empêche que les mouvements vibratoires que l'acte de la combustion communique à l'éther environnant, ne s'accomplissent perpendiculairement à cette ligne et dans un plan quelconque. C'est sous ce point de vue tout à fait général que nous examinerons les phénomènes dans le système des ondulations, sauf à chercher des caractères distinctifs pour constater, s'il est possible, le sens dans lequel les vibrations s'exécutent en réalité.

Digitized by Google

149. Expérience de Fresnel sur les franges produites par la rencontre des rayons réfléchis. — Deux miroirs métalliques plans sont disposés verticalement à côté l'un de l'autre (à peu près comme les feuillets d'un livre ouvert), de manière qu'ils fassent entre eux un angle très-obtus. Une coupe horizontale des miroirs et du faisceau de lumière qui sert à l'expérience est représentée (Pl. 39, Fig. 12). Au-devant de ces miroirs, une lentille cylindrique d'un court foyer *a* concentre en *f* un faisceau de lumière homogène qui vient ensuite tomber en partie sur le miroir *m* et en partie sur le miroir *m'*; les rayons, après s'être réfléchis, *loin de l'intersection des miroirs*, et *loin de leurs bords*, viennent se répandre dans l'espace, et là ils forment des *franges*, c'est-à-dire de petites bandes alternativement sombres et brillantes, que l'on peut observer avec une loupe ou avec un micromètre que nous décrirons un peu plus loin. Ces franges présentent les caractères suivants :

1° Elles sont parallèles à la commune intersection des miroirs;

2° Elles sont symétriques de part et d'autre du plan *lcl'*, qui passe par cette intersection commune et par le milieu de la ligne *pp'* qui joint les images du point *f* sur chacun des miroirs; la frange centrale qui est sur ce plan est toujours une frange brillante ;

3° Les axes de chacune d'elles se trouvent sur des hyperboles dont les foyers sont en *p* et *p'*, et dont le centre commun est en *l*;

4° Si l'on couvre *l'un* des miroirs, ou si l'on arrête avec un écran la lumière qui tombe sur sa surface, *toutes* les franges disparaissent ;

5° Si le faisceau réfléchi par l'un des miroirs traverse une lame transparente à faces parallèles, soit avant, soit après la réflexion, toutes les franges sont déplacées à droite ou à gauche; lorsque chacun des faisceaux traverse une lame de même substance, ce n'est plus en raison des épaisseurs absolues, mais en raison de la différence des épaisseurs de ces lames que le déplacement a lieu.

Cette expérience est l'une des plus importantes de l'optique, parce qu'elle démontre de la manière la plus évidente cette vérité fondamentale, savoir, que, sous certaines conditions, *de la lumière ajoutée à de la lumière produit les ténèbres*. En effet, il est évident, par exemple, que la première frange sombre, qui est à côté de la frange brillante centrale, reçoit de la lumière des

deux miroirs comme la frange centrale elle-même, et que c'est le concours de ces deux lumières qui produit les ténèbres, puisqu'en couvrant l'un des miroirs, cette bande prend un éclat beaucoup plus vif. C'est Grimaldi qui a le premier constaté cette action mutuelle de deux rayons de lumière (*Physico-mathesis de lumine, coloribus et iride*. Bologne, 1665. Prop. 22, p. 187); plus tard, le docteur Young l'a démontrée de nouveau par d'autres moyens, et il en a déduit le principe général des *interférences*, qui exprime à la fois cette action elle-même et les conditions sous lesquelles elle s'exerce. Ce mot *interférence*, introduit dans la science par le docteur Young, signifie donc en général l'action mutuelle que deux rayons de lumière exercent l'un sur l'autre.

150. Principe des interférences.—Ce principe général peut être énoncé de la manière suivante :

Deux rayons homogènes, émanés d'une même source, ajoutent leur éclat quand ils se rencontrent sous une petite obliquité, après avoir parcouru des chemins dont la différence est $0, \frac{2d}{2}, \frac{4d}{2}, \frac{6d}{2}$, c'est-à-dire un nombre *pair* de demi-valeurs de d : au contraire, ils se détruisent et produisent l'obscurité, quand ils se rencontrent après avoir parcouru des chemins dont la différence est $\frac{d}{2}, \frac{3d}{2}, \frac{5d}{2}$, etc., c'est-à-dire un nombre *impair* de demi-valeurs de d.

La valeur de d est un nombre différent pour les diverses couleurs, et même pour les diverses nuances du spectre.

Voici le tableau des valeurs de d, déterminées par Fresnel avec le dernier degré d'exactitude, comme nous le verrons dans un instant.

Tableau des valeurs de d *qui déterminent les périodes d'addition ou de destruction de lumière.*

Limites des couleurs principales.	Valeurs extrêmes de d en millionièmes de millimètre.	Limites des couleurs principales.	Valeurs moyennes de d en millionièmes de millimètre.
Violet extrême	406	Violet	423
Violet indigo	439	Indigo	449
Indigo bleu	459	Bleu	475
Bleu vert	492	Vert	521
Vert jaune	532	Jaune	551
Jaune orangé	571	Orangé	583
Orangé rouge	596	Rouge	620
Rouge extrême	645		

Digitized by Google

Ainsi, deux rayons appartenant au *rouge moyen* du spectre se détruisent, et font du noir, quand ils se rencontrent après avoir parcouru des chemins dont la différence est un nombre *impair* de fois $\frac{620}{2}$ ou 310 millionièmes de millimètre ; pour deux rayons violets, la différence des chemins parcourus doit être seulement un nombre impair de fois $\frac{423}{2}$ ou 212 millionièmes de millimètre.

Reprenons maintenant l'expérience des miroirs, et essayons d'en déduire les preuves du principe que nous venons d'énoncer, et la détermination des valeurs de d.

Le point p (Fig. 12) étant l'image du point f sur le premier miroir, on a $fn = np$ et $cp = cf$.

Par la même raison, à l'égard du second miroir, on a $fn' = n'p'$ et $cp' = cf$.

Donc, $cp = cp'$.

D'où il suit que la ligne lcl' a tous ses points à égale distance des deux images p et p'.

Mais, la lumière qui se réfléchit sur le premier miroir se trouve, pour sa direction et pour le chemin qu'elle fait, exactement comme si elle partait du point p; celle qui se réfléchit sur le second miroir est exactement aussi comme si elle partait du point p'.

Donc, tous les rayons tels que fgb et fhb, qui viennent se rencontrer sur la ligne ll', sont des rayons qui ont parcouru des chemins égaux; et réciproquement la ligne lcl', étant à égale distance des points p et p', se trouve être le lieu des rencontres de tous les rayons qui ont parcouru des chemins égaux. Or, comme il y a partout sur cette ligne une frange centrale brillante, ayant une fois autant d'éclat que la lumière réfléchie par un seul miroir, il en résulte que les rayons ajoutent leur éclat lorsqu'ils se rencontrent après avoir parcouru des chemins égaux.

Considérons actuellement la première frange sombre s, soit à droite, soit à gauche de la frange centrale, et joignons son milieu aux deux points p et p' qui sont censés être les deux points rayonnants. Il est évident que les rayons ps et $p's$ qui arrivent en ce point se rencontrent après avoir parcouru des chemins inégaux dont la différence est $sp - sp'$ pour la frange sombre de

Digitized by Google

gauche, $sp' - sp$ pour celle de droite. Donc, on ne fait autre chose qu'exprimer un fait en disant : Les rayons se détruisent quand ils se rencontrent après avoir parcouru des chemins dont la différence est $sp - sp'$. Or, Fresnel ayant déterminé les positions des points p et p' et mesuré exactement la distance ss, il en a pu conclure aisément la différence des chemins parcourus ; et c'est ainsi qu'il a constaté que les rayons des différentes couleurs se détruisent lorsqu'ils ont parcouru des chemins dont la différence est 310 millionièmes de millimètre pour les rayons rouges, et 212 millionièmes pour les violets, etc., conformément au tableau précédent.

Fresnel a mesuré de même la distance $s's'$ des franges sombres du deuxième ordre, puis celle des franges du troisième ordre, etc. ; puis celle des franges brillantes du premier, du deuxième, du troisième ordre.... Comparaison faite de ces mesures, il en est résulté le principe fondamental que nous avons énoncé plus haut, savoir, que les rayons s'ajoutent quand la différence des chemins parcourus est 0, $\frac{2d}{2}$, $\frac{4d}{2}$, etc., et qu'ils se détruisent quand cette différence est $\frac{d}{2}$, $\frac{3d}{2}$, $\frac{5d}{2}$, etc.

La marche hyperbolique des franges est une conséquence immédiate de ce principe : car il est facile de voir que la série des points pour lesquels la différence $sp - sp'$ des distances aux points p et p' reste constante, forme une branche d'hyperbole ayant ses foyers en p et p' ; que la série des points pour lesquels la différence $s'p - s'p'$ reste constante, forme une autre hyperbole ayant les mêmes foyers; de même pour la série des points dont la différence $s''p - s''p'$ reste constante, etc.

Considérons, en général, la frange brillante correspondante à une différence de n ondulations, ou à une différence de chemins parcourus égale à nd ; représentons par $2a$ et $2b$ le premier et le second axe de l'hyperbole correspondante, et par $2c$ la distance connue des deux images p et p' ou des deux foyers. On aura pour caractères de cette hyperbole $a = \frac{nd}{2}$, $b = \sqrt{c^2 - a^2}$; si l'on suppose que les franges soient reçues sur un tableau perpendiculaire à la ligne lcb et placé à une distance m de la ligne po', la frange dont il s'agit sera éloignée de la

Digitized by Google

frange centrale d'une quantité $x = a\sqrt{\frac{m^2}{b^2}+1}$. Si le tableau est assez loin pour que m soit très-grand par rapport à b, on peut négliger 1 par rapport à $\frac{m^2}{b^2}$ et l'on a seulement $x = \frac{am}{b}$, ou $x = \frac{am}{c}\left(1-\frac{a^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}$ ou $x = \frac{am}{c}\left(1+\frac{a^2}{2c^2}\right)$ en s'arrêtant aux deux premiers termes du développement, parce que c est plus grand que a, ou enfin, en mettant pour a sa valeur,

$$x = \frac{ndm}{2c}\left(1+\frac{n^2d^2}{8c^2}\right).$$

Quand n ne sera pas excessivement grand, on pourra négliger le second terme et prendre seulement

$$x = \frac{ndm}{2c}.$$

Alors l'intervalle z entre deux franges consécutives, qui est ce que l'on appelle la *largeur d'une frange*, sera donné en nombre par cette formule simple :

$$z = \frac{dm}{2c}.$$

Ce qui permet de déduire la valeur de d ou la longueur d'ondulation, quand par des mesures précises on a obtenu les valeurs de c, de z et de m.

On peut aussi déterminer quel est l'angle des miroirs correspondant à des franges d'une largeur donnée, et reconnaître que cet angle s'élève à plusieurs degrés avant que les franges cessent d'être visibles.

On conçoit maintenant pourquoi les franges disparaissent lorsqu'on supprime la lumière réfléchie par l'un des miroirs, car il ne peut plus alors y avoir d'interférences : les rayons du miroir découvert suivent leur route sans être partiellement détruits, et il en résulte une lumière de teinte uniforme dans toute l'étendue du faisceau réfléchi.

On conçoit pareillement pourquoi les franges sont déplacées par l'interposition d'une lame transparente dans le faisceau de l'un des miroirs; car, la vitesse de la lumière étant différente dans les différents milieux, les rayons ne mettent pas le même temps pour traverser l'épaisseur de la lame interposée et pour

traverser une même épaisseur d'air. S'ils mettent plus de temps dans la lame, ils sont comme s'ils avaient plus de chemin à faire dans l'air. Il en résulte par conséquent une véritable inégalité dans les chemins parcourus, bien que les longueurs de ces chemins soient géométriquement égales. De là le déplacement des franges, et comme le sens de ce déplacement, observé pour la première fois par M. Arago, annonce toujours un retard dans la lumière qui traverse la lame de verre, il en résulte d'une manière incontestable que la lumière se meut plus lentement dans le verre que dans l'air.

151. Explication du principe des interférences dans le système des ondulations. — Concevons une ligne indéfinie *ax* (Pl. 39, Fig. 8), suivant laquelle se propage de la lumière simple d'une nuance quelconque. Admettons d'abord, pour rendre l'explication plus facile, que les mouvements de vibration s'accomplissent dans le sens du rayon, c'est-à-dire, que sur la ligne *ax* une molécule donnée d'éther reçoive successivement deux vitesses contraires : par exemple, des vitesses positives qui la poussent dans le sens *ax* de la propagation, et ensuite des vitesses négatives qui la rappellent dans le sens *xa* vers l'origine du mouvement que nous supposerons quelque part à gauche du point *a*. Les vitesses positives passent nécessairement par divers degrés d'intensité : elles sont nulles d'abord, elles deviennent croissantes, atteignent un *maximum*, et décroissent ensuite jusqu'à redevenir zéro. Il en est de même des vitesses négatives, et l'on admet de plus que celles-ci passent exactement par les mêmes périodes que les premières. Par conséquent, si l'on considère au même instant toutes les molécules de la ligne *ax*, on en trouvera dans tous les états et avec tous les degrés possibles de vitesse. Au point *e*, par exemple, la vitesse sera nulle; puis les points précédents jusqu'au point *d* auront des vitesses positives, qui seront croissantes jusqu'en *p*, puis ensuite décroissantes; de *d* en *c*, les vitesses seront négatives, ayant aussi leur maximum au point *p*; de *c* en *a* se renouvelleront exactement les mêmes périodes, et ainsi de suite sur toute l'étendue de la ligne lumineuse. La longueur de la ligne *ec* sur laquelle se trouve une période complète des vitesses, dans leur ordre, est ce que l'on appelle *la longueur de l'ondulation*. C'est cette longueur qui est de 620 millioniémes de millimètre pour les rayons rouges moyens, et de 423 millioniémes seulement pour les violets.

Digitized by Google

Ainsi, en suspendant par la pensée la course rapide d'un rayon lumineux, et en l'observant tel qu'il est à cet instant, l'on trouverait pour la lumière rouge un million d'ondulations dans la longueur de 620 millimètres ou un million d'espaces tels que *ac*, *ce*, etc.

Maintenant, pour mieux peindre aux yeux les divers états des molécules dans la longueur d'une ondulation, l'on peut, de chaque molécule, élever sur la ligne *ax* une perpendiculaire qui représente en longueur la vitesse correspondante; et comme la direction de cette vitesse est de *a* vers *x* pour les points compris entre *e* et *d*, et au contraire de *x* vers *a* pour les points compris entre *d* et *c*, si l'on élève ces perpendiculaires *au-dessus* de *ax* pour le premier cas, et *au-dessous* pour le second, la ligne sinueuse *cmdme*, formée par les extrémités de ces perpendiculaires, pourra donner une juste idée de la direction et de la grandeur des vitesses. Les lignes courbes des vitesses, formées d'après ces principes et ces conventions, peuvent servir ainsi à caractériser les ondulations; et comme on peut concevoir une infinité de courbes différentes, passant par les points *e*, *d* et *c*, et remplissant les conditions voulues de grandeur et de symétrie, il est évident qu'il peut y avoir une infinité d'ondulations différentes, ayant toutes la même longueur.

Après avoir reconnu l'état dans lequel se trouvent les *divers points* de la ligne lumineuse *ax* à *un instant donné*, nous devons examiner encore l'état d'*un même point*, considéré dans *plusieurs instants consécutifs*. Le point *e*, par exemple, est en repos, sa vitesse est nulle; mais, dans les instants suivants, toutes les vitesses qui affectent *présentement* les points précédents, jusqu'à *c*, viendront affecter *successivement* le point *e*. Ainsi, dire qu'une ondulation passe par un point donné, c'est dire que ce point reçoit successivement, et dans leur ordre, toutes les vitesses qui constituent l'ondulation.

Cela posé, considérons une autre ligne *ax* (Fig. 9), et une autre ondulation identique à la précédente, qui se propage suivant cette ligne; supposons de plus que cette seconde ondulation se trouve d'accord avec la première, c'est-à-dire qu'à un instant donné les points de repos et de mouvement se correspondent exactement. Il est clair que s'il y a ainsi accord parfait à un instant, cet accord se soutiendra toujours. Quand le point *e* sera en repos sur la première ligne, il sera en repos sur la seconde; quand il aura le maximum de vitesse positive sur la pre-

mière, il aura le maximum de vitesse positive sur la seconde, etc. Or, si l'on pouvait, par un moyen quelconque, amener le rayon lumineux *ax* de la figure 9 en coïncidence avec le rayon *ax* de la figure 8, sans rien changer à l'accord où ils se trouvent, il est évident que toutes les vitesses seraient doublées par la superposition des petits mouvements, et que l'intensité de la lumière en serait augmentée.

Le résultat serait le même encore si l'un des rayons était en retard ou en avance sur l'autre, d'une ou de plusieurs ondulations entières, ou, ce qui est la même chose, d'un *nombre pair* de demi-ondulations.

Et enfin il serait encore le même si les deux rayons, au lieu de se superposer, venaient seulement concourir au même point et se rencontrer sous une petite obliquité.

Donc, premièrement, deux rayons homogènes ajoutent leur éclat quand ils se rencontrent sous une petite obliquité, et que l'un d'eux est, à l'égard de l'autre, en avance ou en retard d'un *nombre pair* de demi-ondulations.

Mais, si l'un des rayons est en retard sur l'autre d'une demi-ondulation, comme le rayon *a'x'* (Fig. 10) à l'égard du rayon *ax* (Fig. 9), les phénomènes changent complétement d'apparence : alors le point *e*, par exemple (Fig. 9), correspond au point *f'* (Fig. 10). Le premier de ces points va être traversé par l'onde *edc*, et le deuxième par l'onde *f'e'd'*; ainsi, l'un prendra des vitesses positives, tandis que l'autre recevra des vitesses négatives égales, et *vice versa*.

Par conséquent, si l'on suppose que les deux rayons *ax* et *a'x'* soient amenés en coïncidence, les vitesses se détruiront à chaque instant par leur superposition, et tous les points seront en repos; il n'y aura plus de mouvement et plus de lumière.

Ainsi, la coïncidence de deux rayons homogènes peut produire les ténèbres complètes.

Le résultat serait le même si l'un des rayons était en retard ou en avance sur l'autre, d'un nombre impair quelconque de demi-ondulations.

Il serait le même encore si les rayons se rencontraient sous une petite obliquité.

Donc, secondement, deux rayons homogènes se détruisent et produisent les ténèbres quand ils se rencontrent sous une petite

obliquité, et que l'un est à l'égard de l'autre en retard ou en avance d'un *nombre impair* de demi-ondulations.

L'analyse que nous venons de faire des mouvements oscillatoires qui s'accomplissent dans le sens du rayon s'applique évidemment à ceux qui pourraient s'accomplir perpendiculairement au rayon, pourvu qu'ils se trouvent dans le même plan, car s'ils se trouvent dans des plans différents, leur composition est soumise à d'autres lois.

C'est ainsi que le principe des interférences devient une conséquence nécessaire du système des ondulations. En se reportant maintenant à l'expérience des miroirs, on pourra facilement en faire l'analyse, et reconnaître que l'inégalité des chemins parcourus par les rayons qui viennent former les franges sombres et brillantes, produit un retard d'un nombre impair de demi-ondulations dans le premier cas, et d'un nombre pair dans le second.

152. Description de l'appareil général de diffraction. — Les figures 1 à 6 représentent les diverses pièces dans l'appareil complet de diffraction ou *banc de diffraction* que j'ai fait construire pour la Faculté des sciences, par M. Soleil, qui apporte des soins minutieux et une ingénieuse habileté dans la construction des instruments d'optique.

a est un plateau de bois, supporté par des vis calantes, il a un peu plus de deux mètres de longueur; *b* est une pièce de fonte très-solide, de deux mètres de longueur, ajustée à la manière d'un banc de tour, c'est-à-dire que ses deux bords supérieurs sont parfaitement droits; l'un *c* est plat, et l'autre *d* prismatique; sur ce banc viennent s'adapter des supports de cuivre, tels que *s* (Fig. 1), *s'* (Fig. 2), *s''* (Fig. 3), ayant tous la même hauteur et le même axe; on voit dans le support *s''* l'espèce de coulisse destinée à recevoir successivement les fiches n° 1 à n° 17 (Fig. 4), sur lesquelles sont disposés les appareils qui doivent agir sur la lumière. Parmi ces appareils, les deux premiers sont destinés à être mis sur le *premier support s'*, c'est-à-dire à la tête du banc; ils servent seulement à disposer la lumière en faisceaux de formes et de dimensions convenables; les autres sont destinés à être mis sur le *deuxième support s''*, c'est-à-dire à une certaine distance déterminée derrière le premier support, pour recevoir la lumière et produire les différents phénomènes d'interférence ou de diffraction.

Digitized by Google

N° 1. Lentille cylindrique pour la tête du banc;

N° 2. Appareil à biseaux, donnant une fente de grandeur variable; il doit, pour plusieurs expériences, se substituer à la lentille cylindrique;

N° 3. Écran à biseau qui couvre la moitié de l'ouverture de la fiche;

N° 4. Un fil fin de métal, un crin ou un cheveu;

N° 5. Une aiguille, ou une bande taillée en pointe;

N° 6. Une tige d'environ un millimètre de diamètre. Il y a de chaque côté un écran mobile, l'un opaque pour l'expérience du docteur Young, l'autre transparent pour l'expérience de M. Arago.

N° 7. Petit cercle opaque sur une lame de verre;

N° 7 *bis*. Ouverture circulaire plus petite que le cercle opaque n° 7; elle doit être mise sur le premier support, quand on met le cercle n° 7 sur le deuxième;

N° 8. Appareil à biseaux pour le deuxième support; la tête de la vis doit être divisée pour que l'on puisse mesurer avec exactitude la largeur de l'ouverture, ou la distance des biseaux;

N° 9. Ouverture circulaire d'environ un millimètre pour les franges circulaires; il en faut deux pareilles, l'une pour le premier support, l'autre pour le deuxième;

N° 10. Miroir de verre noir, pour les franges qui se produisent par l'influence des bords sur la réflexion; on en voit la coupe au-dessous;

N° 11. Miroir semblable au précédent, mais assez étroit pour que les deux bords agissent à la manière de deux biseaux voisins; on en voit la coupe au-dessous;

N° 12. Trois tiges de un à deux millimètres de diamètre; les deux tiges des bords ne servent qu'à produire des fentes de chaque côté de celle du milieu; dans cet état, elle sert à faire avec la lumière solaire l'expérience des fentes étroites, du docteur Young; il y a en outre un écran opaque pour fermer à volonté une des fentes, sur une partie de sa hauteur; de l'autre côté, l'écran de verre de M. Arago, pour couvrir les deux fentes ou une seule;

N° 13. Appareil semblable au précédent, mais à tiges plus minces, pour faire les mêmes expériences avec la lumière de la lampe;

Digitized by Google

N° 14. Deux ouvertures circulaires très-petites pour l'expérience de Grimaldi, avec des écrans semblables aux précédents ;

N° 15. Disposition du bi-prisme de M. Pouillet, représenté à part (Fig. 5);

N° 16. Disposition des miroirs de Fresnel, représentés à part (Fig. 11);

N° 17. Réseau, formé par des traits aux diamants équidistants parallèles, soit sur du verre, soit sur des plaques de métal ; il y a de 20 à 100 traits au millimètre.

Pour faire les expériences avec la lumière solaire, on ramène dans la chambre noire, au moyen de l'héliostat, un faisceau de lumière suivant l'axe optique du banc de diffraction, et cette lumière, préparée par la lentille n° 1 ou par l'ouverture n° 2 du premier support, vient tomber sur l'appareil du deuxième support. Si l'on veut agir sur la lumière homogène, on met un verre rouge derrière le premier support, ou bien l'on adapte un prisme au volet même de la chambre noire, et l'on projette successivement ses diverses couleurs sur le banc de diffraction.

Lorsqu'on veut se servir de la lumière artificielle, on met en avant de la tête du banc une flamme d'alcool salé ou une lampe Carcel, portant, outre sa cheminée de verre, une cheminée de tôle percée, vis-à-vis la flamme, d'une petite fenêtre par laquelle la lumière se dirige suivant la longueur de l'appareil, et l'on procède comme avec la lumière solaire.

Dans l'un et l'autre cas, les franges produites viennent s'observer près de l'autre extrémité du banc avec le *micromètre de Fresnel* qui est mis en place dans la figure 1. Cet appareil se compose d'une vis micrométrique v dont le pas est par exemple de $\frac{1}{2}$ millimètre, et dont la tête t est divisée, je suppose, en 500 parties, en sorte qu'une division corresponde à un déplacement d'un millième de millimètre; la vis entraîne dans son mouvement une pièce de cuivre percée d'un trou dans lequel s'adapte une loupe représentée à part en l, et au foyer de la loupe est tendu un fil vertical très-fin qui se déplace avec elle et avec la pièce de cuivre sur laquelle elle est montée. On comprend d'après cela que, pour mesurer la distance absolue de deux franges sombres ou brillantes, il suffit d'observer sur la tête de la vis de combien de divisions elle a dû tourner pour que le fil micrométrique passe du milieu de l'une des franges au milieu de

l'autre. Pour amener la loupe vers le point où tombent les franges, on fait mouvoir latéralement tout le système du micromètre sur la grande pièce *y*, au moyen d'un pignon denté *z* et d'une crémaillère *w*. Les distances entre l'appareil agissant du deuxième support et le fil micrométrique de la loupe se mesurent avec une grande exactitude au moyen de la division du banc lui-même.

Les miroirs de Fresnel sont, comme nous l'avons dit, montés sur la fiche n° 16, mais nous avons pensé qu'il était nécessaire de les représenter à part et plus en grand (Fig. 11). Le premier miroir *m* est fixé par trois vis; le deuxième *m'* est mobile sur les pointes des deux vis *a* et *b*, et il s'incline plus ou moins, au moyen de la troisième vis *c*. La fiche qui les porte se met à environ 2 décimètres de la tête du banc, et l'on peut alors avancer le micromètre depuis l'extrémité du banc jusqu'auprès des miroirs, pour observer les franges dans diverses positions, soit qu'on les produise au moyen de la lumière du spectre, ou au moyen de la lampe Carcel et d'un verre rouge.

Comme cette expérience est assez délicate, j'avais imaginé autrefois d'y suppléer par le double prisme de la fiche n° 15, dont la section est représentée à part dans la figure 5 : l'inclinaison des faces *a* et *b* est fort exagérée, car elle doit être excessivement petite; on comprend que les épaisseurs du verre traversées par la lumière étant très-peu différentes, on obtient ainsi des différences de chemins parcourus analogues à celles que donnent les miroirs, et par conséquent des franges qui présentent les mêmes caractères.

Lorsqu'on fait ces expériences ainsi que les suivantes avec de la lumière blanche, les phénomènes changent d'apparence : on n'observe plus des franges alternativement sombres et brillantes, mais bien des franges diversement colorées. En effet, les franges violettes étant toujours plus étroites que les rouges, et par conséquent plus serrées, on voit que les différents systèmes de franges des diverses couleurs se superposent en empiétant les unes sur les autres, de manière à former des teintes composées qui se succèdent dans un ordre parfaitement régulier. La figure 7 donne une idée de cette composition; elle représente seulement les franges rouges, vertes et violettes, et il est facile de juger à l'œil de ce que l'on obtiendrait en les superposant.

Digitized by Google

153. Franges produites par les bords des écrans. — Lorsqu'on met sur le premier support de l'appareil général la fiche n° 1, et sur le deuxième support la fiche n° 2, la ligne qui va du foyer de la lentille cylindrique au bord de l'écran détermine l'ombre géométrique, et l'on reconnaît qu'il n'y a aucune frange dans cette ombre à quelque distance qu'on l'observe ; il y a seulement une teinte qui va en se dégradant rapidement : mais au dehors de l'ombre, dans l'espace qui devrait être uniformément éclairé, on distingue plusieurs franges sombres et brillantes lorsqu'on emploie de la lumière homogène, et plusieurs franges de diverses couleurs lorsqu'on emploie de la lumière blanche. En les observant, avec le micromètre, à diverses distances, on constate aisément que la première, la deuxième et toutes les suivantes se trouvent sur des branches d'hyperboles de plus en plus ouvertes, ayant leur sommet au bord de l'écran et leur centre commun au milieu de la distance qui sépare l'écran du point lumineux, c'est-à-dire du foyer de la lentille. Ces observations, pour constater la marche hyperbolique des franges, se font aisément au moyen d'un écran large à bords parallèles, puisqu'il suffit alors de mesurer la distance de deux franges de même ordre, situées l'une à droite, l'autre à gauche, d'en retrancher la largeur de l'ombre de l'écran, et de prendre la moitié du reste, qui exprime la distance de la frange à l'ombre géométrique.

Voici maintenant le principe général au moyen duquel Fresnel explique la formation des franges et toutes leurs propriétés, quel que soit l'appareil qui serve à les produire :

« Les vibrations d'une onde lumineuse dans chacun de ses points peuvent être regardées comme la somme des mouvements élémentaires qu'y enverraient au même instant, en agissant isolément, toutes les parties de cette onde considérée dans une quelconque de ses positions antérieures. »

Ainsi, le point f (Fig. 13) étant un point lumineux, ou le foyer d'un faisceau de lumière simple, et le cercle xzx' représentant une portion de l'une des ondes envoyées par ce point lumineux, la vitesse qui se produira en un point quelconque p, lorsque cette portion de l'onde y passera, sera la même que la vitesse qui serait produite en ce point par la résultante de toutes les actions que les divers éléments *amc* de l'onde pourraient exercer sur lui, en les considérant comme autant de centres

Digitized by Google

d'ébranlement ou de points lumineux particuliers. Il arrive même que dans la composition des mouvements élémentaires envoyés en p par les diverses parties de l'onde xzx', l'on ne doit tenir compte que des parties qui avoisinent le point z situé sur la ligne fp, et négliger complétement celles qui en sont assez éloignées pour que les lignes correspondantes, telles que ap, mp, cp, aient une inclinaison sensible, parce que leurs actions deviennent contraires et se détruisent mutuellement. En effet, prenons, par exemple, les trois points a, m, c, de manière que $ap - mp$ soit égal à $mp - cp$ et égal à une demi-ondulation; à cause de l'obliquité de ces lignes, et de leur longueur qui est comme infinie par rapport à la longueur si petite d'une demi-ondulation, il est clair que les arcs très-petits ma et mc seront égaux entre eux; or, les ondulations qui arriveraient en p suivant ap et suivant mp étant en discordance, c'est-à-dire en différence d'une demi-ondulation, se détruiraient; pareillement, les ondes qui partiraient de tous les points compris entre a et m étant en discordance avec celles qui partiraient des points correspondants compris entre m et c, il y aurait destruction complète, puisque $am = mc$. Donc la résultante des actions de l'onde xzx' sur le point p ne dépend que des actions produites par les divers points de cette onde qui sont à une petite distance du point z. Ce que nous disons du point p s'applique au point p' et à tout autre point quelconque; c'est-à-dire que la résultante des actions que les divers points d'une onde exercent sur un point donné dépend seulement des actions produites par les points de cette onde qui se trouvent à une petite distance de la ligne menée du point lumineux au point donné. Quand l'onde se propage librement, toutes ces résultantes sont égales pour des points qui sont à la même distance du point lumineux, et la lumière est uniforme.

Mais quand l'onde xzx' rencontre un obstacle, par exemple, un écran ze (Fig. 14), la portion zx' étant arrêtée, la résultante des actions qui s'exercent au point p est seulement produite par les divers points de la portion zx de l'onde qui est libre. Par conséquent, pour connaître l'influence d'un écran, il faut savoir calculer la résultante des actions que les divers points de la partie libre de l'onde peuvent exercer sur un point donné.

Or, si ce point est en p' par exemple, de telle sorte que la

ligne *fp'* vienne percer la surface de l'onde *xzx'* en un point *z'* un peu éloigné du bord *z* de l'écran, il suit de ce que nous venons de voir que la résultante étant seulement dépendante des points qui avoisinent le point *z'* et tout à fait indépendante des points éloignés comme *z* et *x'*, l'éclat de la lumière reçue en *p'* ne sera modifié en rien par la présence de l'écran. Voilà pourquoi les franges diffractées ne s'étendent jamais qu'à une petite distance angulaire du bord de l'écran.

Mais si le point donné est en *p"* de manière que *fp"* perce l'onde en un point *z"* assez voisin de *z* pour que l'action exercée suivant *zp"* ne puisse être négligée, alors la lumière qui arrive en ce point *p"* est modifiée par la présence de l'écran.

Nous allons essayer de faire comprendre le principe de ces modifications et la cause des alternatives d'ombre et de lumière qu'elles produisent. Pour simplifier les idées, nous raisonnerons seulement sur ce qui arrive dans le plan de la figure; il est facile de voir que tout sera pareil dans les plans voisins de celui-ci, soit que le foyer *f* provienne d'une lentille cylindrique parallèle au bord de l'écran, soit qu'il provienne d'une lentille sphérique ou d'une très-petite fente.

Soient *f* le point lumineux (Fig. 15), et *xzx'* la portion d'une onde qui se propage vers le point *p*. Menons la ligne *fp*, et séparons par la pensée les effets produits sur le point *p* par les deux portions *xz* et *zx'* de l'onde *xzx'*, ces portions étant assez étendues pour comprendre tous les points de l'onde qui peuvent transmettre en *p* des actions sensibles; car, d'après ce qui précède, nous pouvons négliger tout ce qui est à une distance un peu grande du point *z*. Tout étant symétrique de chaque côté de *fz*, il est évident que la somme des actions produites en *p* par *xz*, sera identique à la somme des actions produites au même point par *x'z*, et que si l'on représente par 1 la vitesse qui résulte des premières, 1 sera aussi la vitesse que doit posséder le point *p* quand il reçoit pleinement et sans obstacle la somme des actions que tous les points *efficaces* de l'onde *xzx'* peuvent exercer sur lui.

Du point *p* comme centre, et d'un rayon *pz*, décrivons un arc de cercle et traçons des lignes *pb*, *ps*, *pb'*, *ps'*, etc., de telle sorte que les parties *bi*, *sr*, *b'i*, *s'r'*, etc., comprises entre les arcs *zx'* et *zk*, soient respectivement égales, la première à une demi-ondulation, la deuxième à deux demi-ondulations, la

troisième à trois demi-ondulations, etc.; alors de cette construction simple on pourra tirer les conséquences suivantes :

1° Les arcs correspondants *zb*, *bs*, *sb'*, *b's'*, etc., dépendront, pour leurs grandeurs, et de la distance de l'onde *xzx'* au point lumineux *f*, et de la distance du point *p* à l'onde *xzx'*; mais dans tous les cas ils iront en décroissant avec plus ou moins de rapidité : le premier *zb* étant plus grand que le deuxième, celui-ci plus grand que le troisième, etc.

2° Tous les points compris de *z* en *b* ou sur le premier arc exerceront sur le point *p* des actions *conspirantes* entre elles, quel que soit d'ailleurs l'ordre suivant lequel décroisse l'intensité de ces actions à mesure que l'on s'éloigne de *z*; il en sera de même des actions exercées par les points compris de *b* en *s*, ou sur le deuxième arc, et de *s* en *b'*, et de *b'* en *s'*, etc.

3° Les actions exercées par les points compris de *z* en *b*, ou sur le premier arc, seront *discordantes* avec les actions exercées par les points compris de *b* en *s* ou sur le deuxième arc; celles-ci seront discordantes avec celles du troisième, qui seront discordantes à leur tour avec celles du quatrième, etc.; car l'action qui s'exerce suivant *zp* sera en discordance complète avec celle qui s'exerce suivant *pb*, puisque par hypothèse les longueurs de ces lignes diffèrent d'une demi-ondulation. Par la même raison, chacun des points compris entre *z* et *b* sera en discordance avec l'un des points compris entre *b* et *s*, puisqu'on peut choisir ces deux points de manière que la différence de leurs distances au point *p* soit d'une demi-ondulation, etc.

4° Malgré ces discordances complètes, l'action du premier arc *zb* ne sera que partiellement détruite par celle du deuxième arc *bs*, parce que *zb* est plus grand que *bs*, et parce que les points de *zb* agissent sur le point *p* moins obliquement et par conséquent avec plus d'énergie que les points de *bs*; de même l'action du troisième arc ne sera que partiellement détruite par celle du quatrième, etc.; la résultante totale des actions de l'arc *zx* sur le point *p* n'est donc autre chose que la différence des actions discordantes et contraires produites sur ce point par le premier et le deuxième arc, le troisième et le quatrième, etc.; ou, si l'on veut, cette résultante est l'excès des actions produites par les arcs de rang impair sur les actions produites par les arcs de rang pair, tous ces arcs étant déterminés, comme nous l'avons vu, par la condition que les lignes *pz*, *pb*, *ps* diffé-

Digitized by Google

rent d'une demi-ondulation. C'est cette différence ou cet excès qui donne au point *p* une vitesse dans un sens ou dans l'autre, que nous avons supposée être égale à 1.

5° C'est le premier arc, ou le plus voisin de la ligne *fp* qui détermine le sens de cette vitesse qui est imprimée par la résultante totale; et si l'on pouvait, par exemple, arrêter ou supprimer l'action de tous les points compris entre *z* et *b*, la résultante de tous les arcs restants donnerait en *b* une vitesse moindre que 1, et le point *b* vibrerait dans le sens de la résultante de *bs*, c'est-à-dire qu'il serait en discordance avec la résultante des actions de *zb*. Il suit encore de là que l'action produite par le premier arc seul l'emporte en intensité sur l'action produite par tous les autres ensemble; car le résultat change de signe suivant que le premier y entre ou n'y entre pas. Ce que nous disons ici du premier, par rapport à tous les autres, s'applique à l'un quelconque des arcs par rapport à tous les suivants; l'action isolée de chacun l'emporte toujours en intensité sur la somme des actions de tous ceux qui le suivent.

Ces conséquences nous conduisent à la véritable cause de la production des franges.

En effet, supposons 1° qu'un écran arrête toute la partie *zx'* de l'onde *xzx'* (Fig. 15); le point *p* reçoit alors l'action de la partie *xz* et prend une vitesse égale à 1.

Supposons 2° que le bord de l'écran soit en *b*, alors la partie *bx'* est seule arrêtée, le point *p* reçoit l'action de *xz*, plus l'action de *zb*; ces actions sont conspirantes, et il en résulte en *p* une vitesse égale à 1 de la part de *xz* et plus grande que 1 de la part de *zb*. Donc quand le point *p* est placé à l'égard de l'écran de telle sorte que la somme des distances *fb+pb* au bord de l'écran l'emporte d'*une demi-ondulation* sur la ligne droite *fp*, il reçoit *plus de vitesse* qu'il n'en recevrait *si l'écran n'existait pas*.

Supposons 3° que le bord de l'écran soit en *s*, la partie *sx'* est seule arrêtée; le point *p* reçoit l'action de *xz*, plus l'action de *zs* : la première donne en *p* une vitesse égale à 1; la seconde étant seulement l'excès de la résultante de *zb* sur celle de *zs*, donne une vitesse bien moindre que 1; donc, quand le point *p* est placé à l'égard de l'écran de telle sorte que la somme des distances *fs+ps*, au bord de l'écran, l'emporte de *deux demi-ondulations* sur la ligne droite *fp*, il reçoit beaucoup *moins de vitesse* qu'il n'en recevrait si l'écran n'existait pas.

En suivant le même raisonnement, nous pouvons conclure d'une manière générale que la présence d'un écran augmente la vitesse de vibration sur tous les points pour lesquels la ligne brisée, qui arrive au point lumineux en passant par le bord de l'écran, surpasse d'un nombre *impair* de demi-ondulations la ligne droite qui arrive directement au point lumineux; la trace de tous ces points forme donc la trace de toutes les franges brillantes; et qu'au contraire la présence de l'écran diminue la vitesse de vibration dans tous les points pour lesquels la ligne brisée qui arrive au point lumineux en rasant le bord de l'écran surpasse d'un nombre *pair* de demi-ondulations la ligne droite qui arrive directement au point lumineux; la trace de tous ces points forme donc la trace de toutes les franges sombres. Nous pouvons conclure de là que les traces de ces franges forment des hyperboles et non des lignes droites; qu'elles sont plus serrées dans la lumière violette que dans la lumière rouge; enfin que leurs distances à l'ombre géométrique changent avec la distance du point lumineux à l'écran, et avec celle du tableau sur lequel on les reçoit.

Dans ce qui précède nous avons seulement parlé des vitesses de vibration que doit prendre le point p suivant sa position par rapport à la partie de l'onde qui n'est pas arrêtée par l'écran, parce qu'en effet ce sont ces vitesses qui résultent immédiatement de la composition des mouvements élémentaires qu'il reçoit des différentes parties de l'onde lumineuse. Quant à l'*intensité de la lumière*, ou à la vivacité de l'impression que nous en pouvons recevoir, elle n'est pas proportionnelle à ces simples vitesses, mais bien au carré de ces vitesses; car elle est évidemment proportionnelle à la force vive, c'est-à-dire au carré de la vitesse multipliée par la densité du milieu; et, au fond de notre œil, cette densité de l'éther est constante pour la même organisation. Remarquons enfin que pour la lumière, comme pour le son, le changement de vitesse ne change pas l'isochronisme des vibrations, mais seulement leur amplitude; un son grave reste toujours grave, parce que ses vibrations s'accomplissent toujours dans le même temps; la lumière rouge reste toujours rouge par la même raison, et la lumière rouge diffère de la lumière violette parce qu'elle correspond à un moindre nombre de vibrations dans le même temps, comme un son grave diffère d'un son aigu par la même cause. C'est en partant de ces données

que Fresnel est parvenu non-seulement à expliquer la formation des franges dans tous les cas possibles, mais à donner des formules pour calculer l'intensité de la lumière et la nature des teintes qui se développent dans les principaux phénomènes d'interférence ou de diffraction.

154. Franges intérieures produites dans l'ombre des corps déliés ou des écrans étroits. — Soient *tt'* (Fig. 16) un écran, *f* un point lumineux, *xtt'x'* l'onde incidente, que nous supposerons appartenir à la lumière rouge homogène, *g* le foyer de la loupe sur laquelle on reçoit l'ombre de l'écran, *gg'* la largeur de l'ombre géométrique, et *p* un point quelconque situé dans cette ombre, dont l'axe est suivant la ligne *fmy*.

Sur le cercle *xtt'x'*, qui représente l'onde incidente, on prend à gauche de *pt* des points *a*, *b*, *c*, *d*, etc., tels que, en les joignant au point *p*, la différence de deux de ces lignes consécutives soit égale à la demi-longueur d'une ondulation.

A droite de *pt'*, on prend pareillement des points *a'*, *b'*, *c'*, etc., qui remplissent la même condition.

Cela posé, pour connaître la vitesse que doit prendre le point *p*, il suffit de remarquer qu'elle résulte des quantités partielles de mouvements envoyées par la portion *tx* de l'onde incidente et par la portion *t'x'*.

Or, les arcs *ta* et *ab* étant essentiellement inégaux, et de plus l'intensité des ébranlements que leurs divers points peuvent exciter en *p* étant différente à raison de leur inclinaison croissante sur la ligne *pf*, il en résulte que ces deux arcs pris ensemble envoient de la lumière au point *p*, qu'il en est de même des deux suivants, jusqu'à ce que l'on arrive à un groupe de deux arcs pour lesquels les lignes menées au point *p* soient tellement inclinées sur *pf* que l'on puisse considérer comme tout à fait nulles les différences des ébranlements qui arrivent dans ces directions.

On peut essayer de déterminer par le calcul l'intensité et la direction de cette résultante de tous les ébranlements partiels que les divers points de l'onde *ta* envoient au point *p*, mais jusqu'à présent la théorie n'a pas appris à résoudre cette question d'une manière générale, et d'ailleurs nous devons nous borner ici à faire remarquer que l'arc *ta* est celui de tous qui produit le plus grand effet sur le point *p*, parce qu'il agit de plus près et sous la moindre obliquité. Ainsi la résultante aura,

Digitized by Google

dans tous les cas, une direction telle que *pr*, plus ou moins rapprochée de *pt*. Mais cette direction changera par deux causes : 1° la distance du point lumineux à l'écran restant la même, la résultante s'éloignera d'autant plus de *pt* que le point *p* s'approchera davantage du bord de l'ombre géométrique du côté de *g*, parce que les lignes *pa*, *pb* devenant moins obliques, les ébranlements qui arrivent au point *p* suivant ces lignes prennent plus d'intensité ; 2° le point *p* restant le même, si le point lumineux se rapproche ou s'éloigne de l'écran *tt'*, le cercle qui représentera l'onde incidente, et qui passe toujours par les points *t* et *t'*, sera en dedans ou en dehors du cercle *xt*, et cette circonstance changeant la disposition des points *a*, *b*, *c*, etc., et l'obliquité des lignes menées de ces points au point *p*, il est évident que la direction de la résultante *pr* des ébranlements qu'ils excitent en ce point sera elle-même changée, et d'autant plus rapprochée de *pt* que le point lumineux sera plus près de l'écran.

Ainsi, en dernier résultat, la lumière que la portion *ta* de l'onde envoie au point *p* dépend de la largeur de l'écran, de sa distance au point lumineux, et de la position de ce point *p* dans l'ombre géométrique.

Ce que nous venons de dire de la portion *tx* de l'onde s'applique à la portion *t'x'*, qui donne donc aussi au point *p* une résultante *pr'*, dont la direction est plus ou moins rapprochée de *pt'*. Mais, pour une même distance du point lumineux à l'écran, on voit que cette résultante se rapproche de *pt'* à mesure que le point *p* se rapproche du bord *g* de l'ombre géométrique, et par conséquent à mesure que la résultante de *ta* s'éloigne de *pt* ; et réciproquement la résultante *pr'* s'éloigne de *pt'* à mesure que le point *p* s'approche du bord *g'* de l'ombre géométrique, et par conséquent à mesure que la résultante *pr* se rapproche de *pt*.

Ces deux résultantes *pr* et *pr'* déterminent la vitesse du point *p* ; toutes les fois qu'elles seront concordantes, il y aura vitesse plus grande et lumière plus vive, et il y aura moindre vitesse, et par conséquent ténèbres, toutes les fois qu'elles seront discordantes. Le premier cas arrivera quand la différenee des chemins parcourus *pr* et *pr'* sera nulle ou égale à un nombre pair de demi-ondulations ; et le second cas arrivera quand cette même différence sera égale à un nombre impair de demi-ondulations.

Pour tous les points qui sont situés sur l'axe de l'ombre géo-

Digitized by Google

métrique *fmy*, la différence des chemins parcourus sera toujours nulle, et le centre même de l'ombre sera toujours une frange brillante.

En s'écartant de l'axe, sur la ligne *yg*, le point *p* arrivera bientôt dans une position pour laquelle la différence des lignes *pr* et *pr'* sera égale à une demi-ondulation; alors il y aura discordance complète, et par conséquent obscurité; ce phénomène se produira à la même distance à droite et à gauche de la frange brillante du centre, et les deux franges sombres qui en résulteront forment le système des franges sombres du premier ordre.

En continuant de s'écarter de part et d'autre de l'axe, le point *p* passera successivement par des positions pour lesquelles la différence des chemins parcourus *pr* et *pr'* sera deux demi-ondulations, ce qui donnera les franges brillantes du deuxième ordre, puis trois demi-ondulations, franges sombres du deuxième ordre, puis quatre demi-ondulations, franges brillantes du troisième ordre, puis cinq demi-ondulations, franges sombres du troisième ordre, etc.

Si l'on arrête la lumière qui rase l'un des bords de l'écran, on fait à l'instant disparaître les franges, car il n'y a plus d'interférence possible; c'est ce fait fondamental, découvert par le docteur Young, qui l'avait conduit à la théorie des ondulations.

Si l'on fait passer par une lame transparente quelconque la lumière qui rase l'un des bords de l'écran, les franges disparaissent encore lorsque la lame est un peu épaisse, et elles ne font que se déplacer lorsque la lame est très-mince; c'est une observation de M. Arago qui confirme celle du docteur Young, et qui constate en outre que dans les corps solides les ondulations n'ont pas la même longueur que dans l'air. En observant le sens du déplacement des franges et sa grandeur, comparée à l'épaisseur de la lame, on arrive à conclure que le rapport des longueurs d'ondulations est égal à l'indice de réfraction; et comme une ondulation doit toujours s'accomplir dans le même temps, dans tous les milieux, il en résulte que la vitesse de propagation de la lumière dans un milieu est d'autant moindre que ce milieu est plus réfringent.

Pour vérifier, par l'expérience, la formation des franges, leur disparition et leur déplacement, et toutes leurs propriétés, il suffit de disposer sur le premier support la fiche n° 1 ou la fiche n° 2, et sur le deuxième support le n° 4, le n° 5 ou le n° 6. Ces deux

supports doivent être à environ un mètre de distance, et l'on observe les franges avec le micromètre que l'on promène à diverses distances derrière le deuxième support.

En développant les principes dont nous venons de parler, il est facile de voir qu'un écran circulaire opaque de 1 à 2 millimètres de diamètre, éclairé par une lentille ou par un trou rond assez petit, doit donner une ombre circulaire dont le centre se trouve éclairé comme si l'écran était diaphane. Cette conséquence se vérifie aisément : on emploie pour cela la fiche n° 7 *bis* au premier support, et la fiche n° 7 au deuxième ; leur distance doit être de 8 à 10 décimètres, et l'on doit alors placer le micromètre à 2 ou 3 décimètres derrière l'écran opaque.

155. Franges produites par les petites ouvertures.—Soient f (Fig. 17) le point lumineux bb' la largeur de l'ouverture que la lumière traverse, et fg, fg', les limites de l'ombre géométrique.

Pour mieux faire sentir la cause qui produit ici les franges, nous distinguerons trois cas. Il peut arriver :

1° Que l'on observe seulement des *franges extérieures*, c'est-à-dire des franges produites dans l'ombre géométrique de part et d'autre du faisceau lumineux intérieur ;

2° Que l'on observe seulement des *franges intérieures*, c'est-à-dire des franges produites dans le faisceau lumineux intérieur ;

3° Que l'on observe à la fois des franges intérieures et extérieures.

156. Franges extérieures. — Les franges de cette espèce ne peuvent jamais être obtenues que par des ouvertures très-étroites, et même il arrive souvent que près de l'ouverture elles se trouvent mêlées de franges intérieures plus ou moins nombreuses, de telle sorte qu'il est nécessaire, pour les avoir pures, d'aller les observer à une grande distance. Voici les conditions sous lesquelles elles se produisent, et les lois de leur formation :

Du point f, comme centre, décrivons un arc $xbzb'x'$, qui représente l'onde incidente (Fig. 17), et sur la ligne fz, qui passe par le milieu de l'ouverture, concevons un point p à une distance de quelques décimètres des bords b et b'. Si l'ouverture est assez étroite pour que la différence des distances pb et pz ou pb' et pz soit égale seulement à une demi-ondulation, il n'y aura jamais de franges intérieures à une distance des biseaux plus grande que pz. En effet, pour tous les points, tels que p' situés sur l'axe fz, et plus éloignés que le point p, la différence des che-

mins parcourus $p'b'$ et $p'z$ ou $p'b$ et $p'z$ sera moindre qu'une demi-ondulation; par conséquent, de tous les ébranlements envoyés en p' par l'arc zb, aucun ne sera détruit; il en sera de même des ébranlements envoyés au même point par l'arc zb'; de plus, la résultante des premiers sera conspirante avec celle des seconds, il y aura donc une vive intensité de lumière. Ainsi, au delà du point p, jamais l'on n'observera de franges sombres sur l'axe fz.

Maintenant, si par le point p l'on mène la ligne indéfinie ph parallèlement aux biseaux, et que l'on détermine sur cette ligne les points s, s', s'', etc., pour lesquels les différences des chemins parcourus $sb'-sb$, $s'b'-s'b$, $s''b'-s''b$, etc., soient respectivement 2 demi-ondulations, 4 demi-ondulations, 6 demi-ondulations, et en général un *nombre pair* de demi-ondulations, ces points s, s', s'', etc., seront les milieux des franges sombres du premier ordre, du deuxième ordre, du troisième ordre, etc. Au contraire, les milieux des franges brillantes du premier, du deuxième, du troisième ordre, etc., seront donnés par les points r, r', r'', etc., compris entre les premiers, et pour lesquels les différences des chemins parcourus $rb'-rb$, $r'b'-r'b$, $r''b'-r''b$, etc., sont respectivement 3 demi-ondulations, 5 demi-ondulations, 7 demi-ondulations, et en général un *nombre impair* de demi-ondulations.

En effet, dans le premier cas, il s'agit du point s', par exemple, on conçoit que la portion bzb' de l'onde incidente puisse être divisée, à partir du point b, en quatre parties telles que les distances de s' à la fin de la première, de la deuxième, de la troisième et de la quatrième, qui se termine en b', surpassent $s'b$ de 1 demi-ondulation, 2 demi-ondulations, 3 demi-ondulations, et 4 demi-ondulations. Alors la résultante des ébranlements que la première partie envoie en s' sera discordante avec celle de la deuxième partie, et sera détruite par elle, tandis que celle de la troisième partie sera, par la même raison, détruite aussi par celle de la quatrième. Ainsi le point s' est le milieu d'une frange sombre. Pour le point s, on partagerait l'arc bzb' en deux parties, en six pour le point s'', etc., et l'on ferait le même raisonnement.

Dans le second cas, s'il s'agit du point r', par exemple, on conçoit que la portion bzb' de l'onde incidente puisse être divisée, à partir du point b, en cinq parties telles que les distances

de r' à la fin de la première, de la deuxième, de la troisième, de la quatrième et de la cinquième, qui se termine en b', surpassent respectivement $s'b$ de 1, 2, 3, 4 et 5 demi-ondulations. Alors, la résultante des ébranlements que la première partie envoie au point r' sera détruite par celle de la deuxième, tandis que celle de la troisième sera détruite par celle de la quatrième; mais il restera celle de la cinquième partie, qui viendra éclairer le point r' de toute son intensité. Ainsi le point r' sera le milieu d'une frange brillante. Pour le point r, on diviserait l'arc bzb' en trois parties, en sept pour le point r'', etc., et l'on ferait le même raisonnement.

Telle est la cause de la formation des *franges extérieures* par des ouvertures étroites.

Il nous reste à présent à indiquer les lois qu'elles suivent dans leur développement.

Puisque les milieux des franges sombres du premier ordre forment la série des points dont les distances aux points b et b' sont de 2 demi-ondulations, il est évident qu'elles se trouvent sur deux branches d'hyperbole ayant pour foyer les points b et b', et pour grand axe une longueur égale à 2 demi-ondulations. Par la même raison les franges des divers ordres se meuvent suivant des hyperboles dont les foyers sont encore en b et b', et dont les grands axes ont respectivement pour longueurs 4, 6, 8, etc., demi-ondulations. Or, ces hyperboles se confondent sensiblement avec leurs asymptotes, et il est facile de voir, en représentant par v la largeur de l'ouverture et par d la demi-longueur d'une ondulation, que la tangente de l'angle des asymptotes avec l'axe des franges est $\frac{nd}{v}$; pour les franges brillantes du premier ordre, du deuxième ordre, etc., n sera 2, 4, etc., et pour les franges sombres, 1, 3, etc., les angles étant assez petits pour être proportionnels à leurs tangentes. On en déduit les lois suivantes :

1° La largeur des franges ou la distance des milieux de deux franges sombres consécutives est en raison inverse de la largeur de l'ouverture;

2° De chaque côté de l'axe les franges sombres consécutives sont équidistantes, et leur distance est égale à la distance de l'axe à la frange sombre du premier ordre, ou, ce qui revient au même, les distances des franges sombres à l'axe forment une

progression arithmétique dont la raison est égale au premier terme;

3° Les largeurs absolues des franges intérieures croissent proportionnellement à la distance à laquelle on les reçoit derrière les biseaux;

4° Les largeurs absolues des franges sont en raison inverse des rapports de réfraction des milieux dans lesquels elles sont produites, car elles sont en raison inverse des ondes, et nous avons vu plus haut que les longueurs des ondes sont en raison inverse des rapports de réfraction.

Ces lois, qui se déduisent si simplement de la théorie de Fresnel, ont été établies pour la première fois dans le travail que nous avons fait en 1815, M. Biot et moi, sur les phénomènes de diffraction; elles étaient alors un pur résultat d'expérience; nous n'avions pu trouver aucune théorie pour les lier ou pour les expliquer, parce que nous adoptions exclusivement le système de l'émission, qui ne peut en réalité expliquer la moindre circonstance des phénomènes de la diffraction.

157. Franges intérieures. — Soient f le point lumineux (Fig. 18), b et b' les biseaux, et p un point pris sur l'axe fzv à une distance telle que la différence $pb-pz$, ou $pb'-pz$ soit une demi-ondulation. Nous venons de voir qu'au delà du point p il n'y a pas de franges intérieures; mais nous allons montrer qu'en deçà du point p, c'est-à-dire plus près de l'ouverture, il y a successivement *sur l'axe* des franges sombres et brillantes. En effet, on conçoit qu'il existe des points s, s', s'', pour lesquels les différences $sb-sz$ ou $sb'-sz$, $s'b-s'z$ ou $s'b'-s'z$, $s''b-s''z$ ou $s''b'-s''z$, etc., seront respectivement 2, 4, 6, ou en général un nombre pair de demi-ondulations; et ces points seront les milieux de franges sombres, puisque chacun des ébranlements qu'ils reçoivent des parties zb et zb' de l'onde incidente est détruit par lui-même. Au contraire, les points r, r', etc., compris entre les premiers, sont tels que les différences $rb-rz$ ou $rb'-rz$, $r'b-r'z$ ou $r'b'-r'z$, etc., seront de 3, 5, ou en général un nombre impair de demi-ondulations, et ces points seront les milieux de franges brillantes, puisqu'ils éprouvent de la part des arcs bz et bz' des ébranlements concordants, qui sont chacun séparément capables de les éclairer. Ainsi, la condition qui nous a servi plus haut à déterminer les distances où les franges extérieures commencent à être seules, nous donne pareillement les

limites desquelles il faut partir pour observer des franges intérieures en se rapprochant des biseaux.

Maintenant, pour donner une idée du nombre et des distances des franges intérieures, nous examinerons seulement le cas où la lumière incidente est de la lumière parallèle. L'onde qui tombe sur l'ouverture étant alors représentée par la ligne droite *bb'* (Fig. 19), prenons sur l'axe du faisceau un point *p* tellement situé que la différence *pb*—*pz* ou *pb'*—*pz* soit un nombre pair de demi-ondulations, par exemple 10 demi-ondulations. Ce point *p* sera le milieu d'une frange sombre, puisque chacun des ébranlements des arcs *zb* et *zb'* se détruit séparément, bien que cette destruction ne soit pas totale. Pour des points voisins du point *p*, et comme lui situés sur l'axe, ou plus près ou plus loin des biseaux, la différence sera 11 demi-oscillations ou 9 demi-ondulations; donc il y aura lumière, comme nous venons de le voir dans la figure précédente, et le chemin qu'il faudra faire pour arriver à ces points sera d'autant plus court que les biseaux seront plus écartés l'un de l'autre. Mais arrêtons-nous au point *p*, et essayons de faire voir que sur la ligne horizontale *ph* il y aura à côté de lui dans le faisceau lumineux lui-même des franges intérieures alternativement brillantes et sombres. Concevons que l'on prenne sur *ph* un point *s*, déterminé par la double condition que les différences *sb* — *sm* et *sb'* — *sm* soient l'une et l'autre un nombre pair de demi-ondulations, par exemple la première 8 et la seconde 14, il est évident que le point *s* sera alors le milieu d'une frange sombre, et, en général, il y aura sur *ph* autant de franges sombres qu'il y aura de points analogues au point *s*, c'est-à-dire tels que les différences *sb* — *sm* et *sb'* — *sm* soient l'une et l'autre égales à un nombre pair quelconque de demi-ondulations : d'ailleurs, il est facile de voir que ces franges sombres seront d'autant plus nombreuses et plus serrées que l'ouverture sera plus grande, et le point lumineux et la ligne *ph* l'un et l'autre plus rapprochés des biseaux : au contraire, les franges brillantes seront déterminées par les points *r*, pour lesquels les différences *rb* — *rn* et *rb'* — *rn* sont chacune égale à un nombre impair de demi-ondulations, puisque alors ces points recevront de chaque partie *bn* et *b'n* de l'onde incidente des ébranlements conspirants, et dont chacun séparément serait capable de les éclairer.

158. **Franges intérieures et extérieures.** — Pour qu'il se

Digitized by Google

produise à la fois des franges intérieures et extérieures, il suffit que l'ouverture soit assez large pour donner naissance à des franges intérieures, et assez étroite pour que les portions de l'onde qui touchent l'un des bords donnent une résultante sensible dans l'ombre de l'autre bord. Sous cette double condition, chacun des systèmes de franges est produit suivant les lois qui lui sont propres.

Les principes que nous venons d'exposer sur les modifications remarquables que présente la lumière homogène d'une seule couleur, en passant au travers des ouvertures rectangulaires, peuvent être étendus à toutes les couleurs simples séparément, et par conséquent à une lumière composée quelconque, puisque, dans tout mélange, chaque couleur élémentaire suit très-exactement les lois qu'elle suivrait si elle était seule.

Pour vérifier ces résultats par l'expérience, on se sert des fiches n° 1 ou n° 2 sur le premier support, et de la fiche n° 8 sur le deuxième. Comme on peut à volonté changer l'ouverture des biseaux, soit en les conservant parallèles entre eux, soit en les inclinant plus ou moins, il est facile de produire les effets les plus variés; les franges s'observent à diverses distances avec le micromètre.

Les petites ouvertures circulaires présentent, dans toute sa simplicité, un phénomène qui confirme de la manière la plus immédiate le principe général que nous avons établi précédemment. Ce phénomène est celui d'une tache noire au centre de l'image dans l'axe du faisceau de lumière qui pénètre par l'ouverture, lorsqu'on observe cet axe à des distances telles, que la différence des chemins parcourus à partir du point lumineux sur l'axe lui-même et sur la ligne brisée qui passe au bord de l'ouverture, est égale à un nombre pair de demi-ondulations. Si l'on représente par a et b les distances de l'ouverture au point lumineux et au fil du micromètre, et par r le rayon de l'ouverture, il est facile de voir que ces distances b sont données par la formule :

$$b = \frac{ar^2}{2mad - r^2}.$$

Ce résultat se vérifie d'une manière frappante en mettant sur le premier support une lentille sphérique à foyer très-court, ou une ouverture circulaire d'environ $\frac{1}{2}$ millimètre, et sur le deuxième support un trou rond d'environ 1 millimètre, fiche

n° 7 *bis;* la distance des supports doit être au moins de 7 à 8 décimètres; la distance du micromètre au deuxième support est donnée par la formule précédente; on compte aisément jusqu'à quatre alternatives, correspondant à $m = 1, 2, 3$ et 4.

159. Franges produites par deux ouvertures très-voisines. — Le nombre, la grandeur et la position de ces franges se déduisent d'une manière très-simple des principes que nous venons de développer. On les observe en mettant sur le premier support les fiches n° 1 ou n° 2, et sur le deuxième support la fiche n° 13 pour la lumière artificielle, et la fiche n° 12 pour la lumière solaire. C'est le docteur Young qui a fait le premier cette expérience, au moyen de laquelle il avait pu observer la marche hyperbolique des franges : en couvrant l'une des ouvertures avec un écran opaque, les franges disparaissent; en les couvrant avec un écran diaphane, elles disparaissent encore; et elles reparaissent lorsque l'écran diaphane couvre les deux ouvertures.

Grimaldi avait le premier fait une expérience analogue avec deux petites ouvertures circulaires, pareilles à celles de la fiche n° 14; c'est cette expérience qui l'avait conduit à énoncer cette vérité fondamentale, que, sous certaines conditions, la lumière ajoutée à la lumière produit les ténèbres.

160. Franges produites par réflexion sur les surfaces polies. — Lorsque après avoir disposé les fiches n° 1 ou n° 2 sur le premier support, on vient disposer sur le deuxième l'une des fiches n° 10 ou n° 11, de manière que la réflexion s'accomplisse sur le miroir sous une obliquité quelconque, le faisceau réfléchi présente des franges plus ou moins nombreuses. Il est facile de voir (Fig. 20) que le faisceau réfléchi est comme s'il avait traversé *obliquement* une ouverture égale à la largeur du miroir, et qu'ainsi il présente des franges intérieures quand le miroir est large, et des franges intérieures et extérieures si le miroir est suffisamment étroit.

161. Franges et spectres produits par les réseaux. — On appelle réseaux des systèmes de petits intervalles tous égaux entre eux, qui peuvent réfléchir ou transmettre la lumière, et qui sont séparés par d'autres intervalles tout à fait opaques ou non réflecteurs pareillement égaux entre eux. Ainsi, des traits équidistants, tracés au diamant sur une lame de verre, forment un réseau quand ils sont assez rapprochés, par exemple, à $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{20}$ ou $\frac{1}{100}$ de millimètre : s'ils sont parallèles, le réseau est parallèle

(Pl. 40, Fig. 2); s'ils se coupent à angle droit, le réseau est à mailles carrées, etc. Des traits semblables, tracés sur une lame de métal poli, forment encore des réseaux, mais qui sont seulement propres à réfléchir la lumière et non pas à la transmettre.

C'est Frauenhofer qui a le premier étudié les phénomènes très-remarquables que présentent les réseaux. Voici le mode d'observation qu'il avait adopté, et les résultats généraux de ses recherches.

La lumière solaire, réfléchie horizontalement par le miroir d'un héliostat, entre dans la chambre noire par une petite ouverture, tantôt par un trou rond, tantôt par une fente verticale formée par deux biseaux adaptés au volet. A une distance de 12 mètres du volet est un théodolite, ou un instrument quelconque portant une lunette horizontale et propre à mesurer les angles. Nous supposerons que cette lunette *l* (Pl. 40, Fig. 1) se meuve autour d'un axe vertical passant en *v* à quelques pouces au-devant de l'objectif; c'est à l'extrémité de cet axe, c'est-à-dire, sur un plateau fixe *pp'*, au centre duquel il passe, que l'on ajuste le réseau *rr'* de manière que ses traits soient verticaux. Le faisceau de lumière blanche tombe perpendiculairement sur le réseau, le traverse, et vient pénétrer dans l'objectif de la lunette, qui ne doit recevoir aucune autre lumière. Alors, en regardant par l'oculaire, on observe le phénomène curieux représenté dans la figure 3.

1° La fente *a* du volet paraît au milieu, éclairée d'une lumière blanche, ayant ses bords parfaitement tranchés, comme si le réseau n'existait pas, et de chaque côté les apparences sont exactement symétriques.

2° Après l'obscurité complète *t*, qui environne l'image de la fente, paraît un brillant spectre *hc* ayant le violet en dedans vers *h*, et le rouge en dehors vers *c*; là il se termine vers un espace obscur *t'*.

3° Au delà de *t'* paraissent à la suite les uns des autres plusieurs spectres de diverses intensités, occupant les espaces *h'c'*, etc., ayant tous, comme le premier, le violet en dedans et le rouge en dehors; seulement le rouge du deuxième tombe sur le violet du troisième, le rouge de celui-ci sur le violet du quatrième, etc.

4° Ceux de ces spectres qui sont assez étalés et assez brillants font voir les mêmes *raies* noires que le sceptre solaire direct;

on y distingue avec une grande netteté ces raies caractéristiques que nous avons désignées par les lettres *c*, *d*, *f*, *g* (Pl. 34, Fig. 19); mais, chose remarquable, les rapports de leurs distances mutuelles sont changés.

5° Si l'on considère la même raie dans les différents spectres, la raie *f* par exemple (qui est marquée *f'* dans le premier, *f''* dans le deuxième, etc.), on trouve que dans le deuxième sa distance au milieu *a* de l'image totale est double de ce qu'elle est dans le premier, puis triple dans le troisième, quadruple dans le quatrième, etc.; d'où il résulte évidemment que les mêmes couleurs ou les mêmes raies occupent dans le deuxième spectre un espace double de celui qu'elles occupent dans le premier, triple dans le troisième, quadruple dans le quatrième, etc.

Tous ces résultats remarquables ont été obtenus par un grand nombre d'expériences et par des mesures d'une extrême précision.

L'appareil de Frauenhofer était, comme le micromètre de Fresnel, très-propre à déterminer de petits angles et de petites distances; on voit qu'il suffisait de faire mouvoir la lunette *l* jusqu'à l'instant où les diverses raies venaient coïncider avec le fil micrométrique intérieur. L'angle *lvl'* qu'elle parcourait était l'angle formé par le rayon diffracté avec le rayon direct.

M. Babinet, qui a fait beaucoup de recherches intéressantes sur la lumière, et particulièrement sur le système des ondulations, a proposé un moyen beaucoup plus simple pour mesurer les distances des spectres de différents ordres (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XL, p. 169). Au lieu d'une seule fente dans le volet, il en emploie deux, dont on peut varier les distances à volonté (Pl. 39, Fig. 6); puis il les observe en même temps avec le même réseau, qu'il rapproche ou qu'il éloigne convenablement, pour amener en coïncidence parfaite les mêmes raies des spectres homologues formés l'un à gauche de l'ouverture de droite, l'autre à droite de l'ouverture de gauche. Connaissant l'écart des deux ouvertures et leur distance au réseau, il est facile d'en déduire l'angle cherché; cette expérience est vue en perspective (Pl. 40, Fig. 4).

Enfin, Frauenhofer a observé deux autres conditions très-remarquables de ces phénomènes, savoir :

1° Que les déviations des mêmes couleurs, ou plus exacte-

Digitized by Google

ment des mêmes raies, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g*, ne dépendent ni de la largeur de l'intervalle transparent des réseaux, ni de la largeur de l'intervalle opaque, mais seulement de la *somme* de ces deux largeurs ;

2° Que les grandeurs absolues de ces déviations sont en raison inverse de cette *somme faite* d'un intervalle transparent et d'un intervalle opaque, tellement que, si dans chaque réseau l'on multiplie cette somme par les déviations correspondantes des raies *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g*, du premier spectre, on obtient des nombres constants, qui se reproduisent toujours dans tous les réseaux et dans toutes les expériences.

Voici ces nombres transformés en millimètres :

Lettres qui indiquent les raies ou les rayons correspondants du spectre solaire.	Produit de la déviation par la somme des intervalles opaques et transparents en millioniémes de millimètre.	Longueur des ondulations en millioniémes de millimètre.	Couleurs correspondantes.
		645	Rouge extrême.
b	688	596	Orangé rouge.
c	656	571	Jaune orangé.
d	589	532	Vert jaune.
e	526	492	Bleu vert.
f	484	459	Indigo bleu.
g	429	439	Violet indigo.
h	393	406	Violet extrême.

Nous avons rapporté dans la troisième colonne les nombres donnés par Fresnel pour exprimer les longueurs d'ondulations des diverses couleurs du spectre, et si l'on se reporte à la figure 19 de la planche 34 pour observer les nuances correspondantes aux raies *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g* et *h*, on sera frappé de l'accord admirable qui existe entre ces résultats. La raie *d* tombe en effet près de la limite du jaune et de l'orangé, tandis que la raie *e* tombe à la limite du jaune et du vert, et il se trouve seulement 6 millioniémes de millimètre entre les nombres de Fresnel et ceux de Frauenhofer, Or, c'est sans le savoir que Frauenhofer déterminait ainsi les longueurs des ondulations. Les différences considérables que l'on observe entre les autres nombres tiennent, d'une part, à ce que les raies correspondantes ne tombent pas aux limites des couleurs du spectre, et à ce que Frauenhofer a puobserver aux extrémités du spectre, et surtout vers le violet, des couleurs qui devaient être tout à fait insensibles dans les expériences de Fresnel.

Après avoir exposé ces résultats tels que l'expérience les a

donnés, il ne sera pas difficile d'en indiquer la cause. C'est M. Babinet (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XL, p. 169) qui en a, je crois, le premier, ramené toutes les circonstances à des considérations très-simples.

Soient rr' le réseau (Pl. 40, Fig. 5), ab, cd, ef, gh, les parties opaques, et bc, de, fg, etc., les parties transparentes; supposons-le, pour plus de simplicité, assez éloigné de la fente du volet pour que les rayons blancs incidents puissent être regardés comme parallèles; z sera l'œil de l'observateur, et zs le rayon direct. Les phénomènes pouvant être observés aussi à l'œil nu, nous supprimerons le théodolite et la lunette.

Les *sommes faites* d'un intervalle opaque et d'un transparent étant très-petites, il y aura toujours une de ces sommes, telle que fh, pour laquelle la différence $zh - zf$ fera précisément 2 demi-ondulations d'une certaine couleur, par exemple, du violet extrême; c'est dans cette direction que l'on verra le violet extrême du premier spectre. En effet, si l'espace fh était tout à fait ouvert, la résultante des ébranlements que la portion fh de l'onde enverrait au point z serait nulle, mais, l'espace opaque hg arrêtant les ébranlements qui détruiraient ceux de l'espace transparent gf, on voit qu'il arrivera en z de la lumière violette, et qu'il en arrivera plus que dans les directions voisines zd et zi. Mais l'intensité de cette lumière dépendra nécessairement du rapport qui existe entre la largeur de l'espace opaque et celle de l'espace transparent; le maximum aura lieu quand ces espaces seront à peu près égaux, car, hg étant moindre que fg, il passerait une partie des rayons discordants, et, hg étant plus grand que fg, il y aurait d'arrêté une partie des rayons concordants avec le rayon zf.

Si maintenant du point z comme centre, avec un rayon zf, on décrit un arc fv, cet arc, considéré comme une ligne droite, forme avec fh un triangle rectangle, fvh, semblable au triangle zhf; d'où il résulte que l'angle de déviation fzh, que nous désignerons par x, est égal à l'angle hfv; par conséquent,

$$\sin x = \frac{hv}{hf} \quad \text{ou} \quad \sin x = \frac{d}{s},$$

en désignant par s la somme d'un intervalle opaque et transparent, et par d la longueur d'ondulation qui est égale à hv.

Digitized by Google

Mais ces déviations des premiers spectres sont si petites, qu'elles peuvent être prises pour leurs sinus, d'où il suit :

$$sx = d;$$

c'est-à-dire que la déviation, multipliée par la somme d'un intervalle opaque et transparent, est égale à une longueur d'onde, comme l'indique le tableau précédent.

Au delà de *fh* il se trouvera un autre intervalle opaque et transparent ou transparent et opaque, tel que les distances de ses deux extrémités au point *z* auront une différence de 4 demi-ondulations. Soit *np* cet espace : puisque $zp - zn$ est égale à 4 demi-ondulations, on pourra diviser l'espace *np* en 4 parties à peu près égales, de telle sorte que les distances des points de division au point *z* croissent successivement de 1 demi-ondulation; si ces 4 parties étaient perméables à la lumière, les rayons passant par la première seraient discordants avec ceux de la deuxième, et se détruiraient; ceux de la troisième seraient discordants avec ceux de la quatrième, et se détruiraient pareillement. Ainsi le point *z* ne recevrait pas de lumière dans cette direction, et il n'en recevrait pas non plus si, dans ces 4 parties, deux consécutives étaient opaques et les deux autres transparentes, c'est-à-dire si l'espace opaque du réseau était égal à son espace transparent; mais, ce cas excepté, le point *z* sera éclairé, et c'est dans cette direction *zp* que l'on verra le violet du deuxième spectre.

Il est facile de voir, comme plus haut, qu'en désignant par x' l'angle de *zn* avec *sz*, on aura :

$$\sin x' = \frac{2d}{s} \quad \text{ou} \quad sx' = 2d.$$

Ainsi, en généralisant ces résultats, la même couleur sera produite par des retards

de 2 demi-ondulations pour le premier spectre,

de 4 pour le deuxième,

de 6 pour le troisième, etc.

Toutes les lois établies par Frauenhofer et rapportées plus haut sont des conséquences évidentes de ce principe fondamental.

Cependant, si l'on voulait se rendre un compte exact, non-seulement des dispositions des différents spectres, mais encore de l'intensité relative de leurs couleurs, il faudrait avoir recours

Digitized by Google

à des calculs plus ou moins compliqués, car il pourrait sans doute arriver que pour certains rapports entre les largeurs des espaces opaques et transparents, la lumière envoyée au point *z* fût la somme des lumières envoyées par plusieurs interstices voisins; et peut-être même la position du maximum d'intensité n'est-elle pas toujours rigoureusement celle qui répond à une différence d'un nombre juste d'ondulations.

Tout ce que nous venons de dire sur les réseaux qui agissent par transmission s'applique sans difficulté aux réseaux qui agiraient par réflexion; de là l'explication des brillantes couleurs que l'on observe sur toutes les surfaces polies qui ont été régulièrement striées.

Nous avons remarqué que les raies du spectre sont en général diversement espacées quand le spectre est produit par des substances ayant des pouvoirs dispersifs différents : dans les phénomènes que nous venons d'étudier, au contraire, les intervalles des raies sont toujours proportionnels. Ainsi, le spectre diffracté est comme un type constant, ou, si l'on veut, comme un *spectre normal* auquel on peut rapporter les dimensions variables des spectres des différentes substances.

Après avoir analysé les phénomènes des réseaux parallèles, il serait superflu d'exposer en détail les apparences que peuvent produire les réseaux croisés de diverses manières. Nous nous contenterons de citer deux exemples qui serviront en même temps à donner une idée des couleurs brillantes que l'on peut obtenir avec les appareils de cette espèce, et à faire voir que les jeux de lumière les plus compliqués et les plus bizarres dépendent toujours des interférences suivant des principes très-simples.

162. Réseaux à mailles carrées. — Un réseau à mailles carrées peut s'obtenir très-simplement en croisant à angle droit deux réseaux parallèles et égaux. Un tel système disposé verticalement devant l'objectif de la lunette, et recevant la lumière solaire par une petite ouverture ronde, présente le brillant phénomène qui est représenté (Pl. 40, Fig. 6), où j'ai tracé seulement le quart de l'image. Tous les petits rectangles symétriquement distribués autour de l'image *m* de l'ouverture sont autant de spectres plus ou moins allongés et plus ou moins détachés les uns des autres. Leur éclat est assez remarquable, et leur nombre si grand que nous n'essayerons pas de les compter. Avec un peu de patience et de soin on parviendra facilement à se rendre

Digitized by Google

compte de toutes les particularités de cette expérience, qui est l'une des plus brillantes de l'optique.

163. Réseaux à mailles rondes. — Nous indiquerons seulement l'image que l'on obtient en plaçant devant l'objectif de la lunette un écran percé de deux trous ronds, de $0^{mm},6028$ de diamètre, et dont la distance des centres est $1^{mm},0371$. Cette image est représentée dans la figure 7.

Chacun des petits compartiments indiqués sur la figure indique le lieu d'un spectre dont les couleurs sont en général vives et très-étalées.

Quand les trous sont plus multipliés, le nombre des spectres devient plus grand; mais leur distribution et l'ordre toujours symétrique suivant lequel ils se groupent, dépendent de la grandeur des trous, de leur intervalle et de leur arrangement.

164. Apparences au foyer des lunettes. — Lorsqu'on regarde une étoile avec une lunette ou un télescope ayant un pouvoir amplifiant qui surpasse 200, on voit au foyer de l'instrument une image très-nette de l'étoile, offrant un disque rond à bords bien tranchés, puis l'on distingue autour du disque une série d'anneaux alternativement brillants et sombres, dont les limites sont légèrement colorées. Il paraît que cette observation a été faite pour la première fois par W. Herschel au moyen de ses puissants télescopes, avec lesquels il fit de si belles découvertes dans le ciel.

En plaçant un diaphragme au-devant de l'objectif, pour en réduire l'ouverture, l'image de l'étoile augmente de largeur, sans cesser pour cela d'être parfaitement ronde et nettement terminée; on peut même, par ce moyen, lui donner toutes les apparences d'une planète : il suffit, par exemple, de réduire le diaphragme à n'avoir plus que 2 ou 3 centimètres d'ouverture, ou à peu près, pour une lunette de 2 mètres de distance focale; en même temps les anneaux qui entourent le disque s'élargissent et se colorent; ils offrent successivement des nuances de blanc, de rouge, de noir et de bleu plus ou moins pâle.

M. Arago a fait de plus cette observation curieuse, qu'en partant du foyer où l'on voit nettement le disque et les anneaux, si l'on enfonce graduellement l'oculaire, le disque devient sombre au milieu, puis tout à fait noir; bientôt cette tache noire s'élargit de plus en plus; un point lumineux reparaît en son centre, qui s'élargit à son tour, pour donner naissance à une

autre tache noire, et l'on peut ainsi compter au centre de l'image plusieurs alternatives d'ombre et de lumière. Mais, si l'on arrête l'oculaire dans l'une de ces positions pour lesquelles le milieu de l'image est obscur, on voit de temps à autre un point brillant paraître un instant vers le milieu de la tache noire; ce phénomène se produit seulement sur les étoiles qui *scintillent*, et jamais sur celles qui sont tranquilles ou qui ne présentent pas à l'œil nu ces changements rapides de couleurs qui constituent la scintillation.

Sir J. Herschel a fait un grand nombre d'expériences intéressantes sur les effets que l'on obtient en plaçant, devant l'objectif des grandes lunettes, des diaphragmes de différentes formes, simples ou multiples, c'est-à-dire composés d'une seule ouverture ronde, carrée, triangulaire, annulaire, etc., ou composés d'un grand nombre de petites ouvertures égales, symétriquement arrangées autour de l'axe.

1° Avec une ouverture formant le triangle équilatéral, l'image offre l'apparence représentée dans la figure 8, c'est le disque de l'étoile, entouré d'un anneau noir, et orné de six rayons minces, droits et assez vivement éclairés. Trois de ces rayons correspondent aux angles du triangle, et trois au milieu des côtés; les uns sont composés de petites franges *longitudinales*, et les autres de petites franges *transversales;* c'est ce qui devient évident quand on enfonce un peu l'oculaire, car on obtient alors l'effet indiqué dans la figure 9.

2° Avec une ouverture annulaire on obtient les apparences représentées dans les figures 10 et 11. La première est l'image de la *Chèvre*, et la seconde celle de la double étoile de *Castor*.

3° Avec une ouverture formée par l'intervalle compris entre deux carrés concentriques on obtient la figure 12. Les quatre rayons qui forment la croix sont composés de taches alternativement brillantes et sombres; les premières paraissent irisées.

4° Avec un assemblage de petits triangles équilatéraux, régulièrement arrangés, on obtient la figure 13 : c'est une série de disques circulaires, rangés sur six rayons égaux et également espacés, qui offrent, à partir du disque central, les vives couleurs du spectre.

Tous ces phénomènes sont certainement des phénomènes d'interférence. La lumière est diffractée par les bords des dia-

phragmes qui rétrécissent ou qui modifient l'ouverture de l'objectif; et si, dans ce cas, les franges intérieures peuvent être produites par des corps beaucoup moins étroits ou par des ouvertures beaucoup plus larges, c'est parce que la lumière incidente est plus ou moins *convergente*, au lieu d'être *divergente* ou *parallèle*, comme nous l'avons supposé pour expliquer les principes de diffraction. Il suffira donc de recourir à ces principes lorsqu'on voudra se rendre compte des effets produits par un diaphragme quelconque, placé dans une position donnée, soit à l'égard de l'objectif d'une lunette, soit à l'égard du miroir d'un télescope; seulement, dans ces expériences, s'il arrive que l'image change d'aspect d'un instant à l'autre, on pourra conclure que la scintillation ajoute ses effets aux effets diffringents du diaphragme.

Explication des anneaux colorés, produits par les lames minces et par les plaques épaisses.

165. Formation des anneaux colorés dans les lames minces. — Tous les corps diaphanes paraissent colorés des plus vives nuances lorsqu'ils sont réduits en lames assez minces : cette proposition générale peut être démontrée par une foule d'exemples, entre lesquels nous choisirons seulement les suivants :

Des boules de verre soufflées à la lampe, et gonflées jusqu'au point où elles éclatent, présentent dans tous leurs fragments des couleurs très-vives et qui sont changeantes comme celles du plumage de certains oiseaux. Il en est de même des lames cristallines *clivées* en feuillets assez minces. Les diverses nuances que prennent les métaux polis, comme le fer et l'acier, par l'effet de la chaleur et du contact de l'air, sont dues à la même cause : ce sont des pellicules d'oxyde qui ne sont colorées que parce qu'elles sont très-peu épaisses. Les liquides prennent aussi de brillantes couleurs, comme on le voit dans les bulles de savon, ou dans les gouttes d'huile qui s'étalent sur de l'eau. Enfin, l'air, les vapeurs et les gaz donnent naissance aux mêmes phénomènes : on le démontre en posant un plan de verre sur une surface convexe, par exemple sur une lentille de 15 ou 20 mètres de rayon; alors, autour du point de contact, on voit paraître des anneaux concentriques, de diverses couleurs, parfaitement réguliers, et ces anneaux se montrent seulement là où la lame d'air comprise entre les verres a très-peu d'épaisseur.

Digitized by Google

Cet appareil mis sous une cloche dans un gaz quelconque présente les mêmes couleurs; il y a plus, il les présente encore dans le vide; d'où il suit qu'une *lame mince de vide* donne des couleurs, comme les lames des différents corps.

166. Lois expérimentales des anneaux colorés établies par Newton.

1re LOI. *Dans chaque substance, les couleurs changent avec l'épaisseur de la lame et avec l'obliquité sous laquelle on la regarde; mais dans tous les cas, elles disparaissent quand la lame est trop mince ou trop épaisse.*

Pour faire varier l'épaisseur de la lame qui produit les anneaux, il suffit de poser légèrement la plaque supérieure sur la lentille inférieure, et de presser ensuite avec plus ou moins de force; alors, dans la première position, l'on distinguera une tache centrale blanche ou colorée autour de laquelle se grouperont des anneaux de diverses couleurs : puis, en regardant toujours sous la même obliquité, on verra cette tache centrale changer de couleur à mesure que la pression deviendra plus forte, et par conséquent la lame d'air plus mince. A un certain degré de pression, la tache centrale paraîtra noire et plus ou moins large : il est facile de reconnaître que sa largeur augmente à mesure qu'on la regarde sous une obliquité plus grande; ce qui suffit pour montrer que ce n'est pas seulement au contact des deux verres que les couleurs disparaissent, mais que près du contact, et jusqu'à une certaine distance, la lame d'air n'a plus assez d'épaisseur pour être colorée. C'est d'ailleurs ce qui se montre aussi dans les bulles de savon : par l'effet de la pesanteur, elles sont toujours plus minces vers leur sommet, et après un certain temps elles y sont assez minces pour qu'on n'y voie plus de couleurs.

2e LOI. *Les couleurs simples donnent des anneaux qui sont alternativement brillants et sombres : dans les différentes couleurs, les anneaux du même ordre ont des diamètres d'autant plus grands que les couleurs qui les forment sont moins réfrangibles.*

Le système des verres étant disposé convenablement et éclairé par la lumière du ciel, si l'on vient regarder les anneaux au

travers d'un verre coloré qui ne laisse passer que de la lumière simple, par exemple le rouge extrême, on n'observe plus autour de la tache centrale que des anneaux alternativement rouges et noirs, formant une série nombreuse (Pl. 40, Fig. 14). Ces anneaux semblent se presser davantage et devenir plus étroits à mesure qu'ils augmentent de diamètre, c'est-à-dire à mesure qu'ils s'éloignent davantage du centre. Les verres étant plus ou moins pressés, l'on voit alors la tache centrale passer successivement du rouge au noir et du noir au rouge un grand nombre de fois. On appelle *anneau du premier ordre* celui qui entoure la tache centrale, quand elle est noire et que les verres se touchent; puis anneau du second ordre, celui qui vient après le premier, etc. Mais l'on conçoit que l'anneau du quatrième ordre pourrait être le premier de ceux que l'on voit autour de la tache centrale : il suffirait pour cela que les verres ne fussent pas bien en contact, et que la tache noire ne fût autre chose que l'anneau noir du troisième ordre qui serait venu se placer au centre à cause de l'écartement des verres.

Le système des verres qui donne les anneaux restant au même état, il suffit de l'éclairer successivement par toutes les couleurs du spectre, pour constater que les couleurs les moins réfrangibles donnent les anneaux les plus larges, et que ces anneaux, pour le même ordre, correspondent par conséquent à des épaisseurs plus grandes.

3ᵉ LOI. *Dans une lame mince quelconque, les épaisseurs correspondant aux anneaux brillants des différents ordres suivent la série des nombres impairs* 1, 3, 5, 7, *etc.*, *tandis que les épaisseurs correspondant aux anneaux noirs suivent la série des nombres pairs*, 0, 2, 4, 6, *etc.*

Soient hth' (Fig. 15 et 16) la courbure de la lentille convexe, gtg' la face inférieure du verre parallèle posé sur la lentille, et aa', cc', ee', les diamètres des anneaux du premier ordre, du deuxième ordre, etc.; les épaisseurs correspondantes de la lame d'air sont ab, cd, ef, gh (Fig. 16). Mais gh, par exemple, est égal à tv, et gt ou $\frac{gg'}{2}$ est égal à hv, qui est moyenne proportionnelle entre tv et $2r - tv$, en appelant r le rayon de courbure de la lentille. On a donc :

$$gh(2r - tv) = \overline{gt^2} \quad \text{ou} \quad gh \cdot 2r = \overline{gt^2},$$

Digitized by Google

parce que tv est très-petit par rapport à $2r$. Il en serait de même pour les autres épaisseurs. Donc les épaisseurs sont entre elles comme les carrés des demi-diamètres, ou comme les carrés des diamètres des anneaux. Ainsi, en mesurant avec un compas les diamètres des anneaux brillants et sombres, après avoir pressé les verres pour qu'ils se touchent, on arrive à constater l'exactitude de la loi précédente.

4ᵉ LOI. *Dans deux lames de diverses substances, les épaisseurs qui correspondent aux anneaux du même ordre produits avec la même lumière sont entre elles en raison inverse des indices de réfraction de ces substances.*

Cette proposition peut être facilement démontrée pour l'air et un liquide quelconque, par exemple l'eau. Il suffit pour cela de produire les anneaux dans l'air comme à l'ordinaire, puis d'insinuer entre les verres une petite goutte d'eau; l'action capillaire poussera bientôt le liquide jusqu'au point de contact des verres, et l'on aura en même temps une lame mince d'eau du côté où le liquide est entré, et une lame mince d'air du côté opposé; ces lames auront la même épaisseur, et les anneaux du même ordre seront loin d'être à la même distance du centre; dans l'eau ils seront visiblement plus près les uns des autres et plus serrés. Il suffira de les mesurer pour en conclure que les épaisseurs auxquelles se forment les anneaux du même ordre sont en effet entre elles en raison inverse des nombres 4 et 3 qui représentent les indices de réfraction de l'eau et de l'air.

167. Après avoir déterminé ces lois expérimentales du phénomène des anneaux colorés, Newton parvint encore à mesurer avec une grande précision l'épaisseur absolue de la lame d'air qui correspond à l'anneau brillant du premier ordre pour chacune des couleurs simples. Cette détermination est importante, car nous verrons tout à l'heure comment elle se lie à la longueur des ondes lumineuses. Pour l'obtenir, Newton posa un verre plan sur une lentille biconvexe, dont les deux faces avaient été travaillées dans le même bassin; sa distance focale principale était de 83ᵖᵒ,4, et son indice de réfraction $\frac{17}{11}$. Par conséquent, le diamètre de la sphère dont ses surfaces faisaient partie était de 182 pouces anglais. Or, nous venons de voir que l'épaisseur correspondant à un anneau quelconque est égale au carré du rayon de l'anneau, divisé par le diamètre de la sphère du verre

convexe ; tout se réduit donc à mesurer exactement le diametre de l'un des anneaux. Newton trouva $\frac{1}{25}$ de pouce pour le diamètre du cinquième anneau sombre, et par conséquent $\frac{1}{25\times182}$ ou $\frac{1}{4550}$ de pouce pour l'épaisseur de la lame d'air. Cette valeur doit subir deux corrections, l'une dépendante de la réfraction de la lumière au travers du verre supérieur qui avait $\frac{1}{6}$ de pouce d'épaisseur, l'autre dépendante de l'obliquité sous laquelle on regarde les anneaux, celle-ci étant nécessaire seulement lorsqu'on veut réduire l'épaisseur à ce qu'elle est pour l'anneau qui est vu perpendiculairement. Ces corrections faites, Newton trouva $\frac{1}{17800}$ pour l'épaisseur de la lame d'air au milieu de l'anneau sombre du cinquième ordre ; et puisque cette épaisseur, en vertu des lois précédentes, se trouve décuple de celle du premier anneau brillant, il en résulte que l'épaisseur absolue de la lame d'air pour le premier anneau brillant est $\frac{1}{178000}$ de pouce anglais.

Cette valeur appartient à la lumière simple qui forme la limite de l'orangé et du jaune.

Les mêmes observations, appliquées aux autres couleurs, conduisent au tableau suivant.

Tableau des épaisseurs de la lame d'air correspondant au milieu de l'anneau brillant du premier ordre pour chacune des couleurs.

Noms des couleurs.	Épaisseurs de l'air en millionièmes de pouce anglais.	Épaisseurs de l'air en millionièmes de millimètre.	Épaisseurs multipliées par 4 en millionièmes de millimètre.
Rouge extrême................	6,344	161,15	645
Orangé rouge................	5,866	148,95	596
Jaune orangé................	5,618	142,70	571
Vert jaune................	5,237	133,01	532
Bleu vert................	4,841	122,97	491
Indigo bleu................	4,513	114,64	458
Violet indigo................	4,323	109,80	439
Violet extrême................	3,997	101,51	406

Enfin Newton avait donné une formule pour exprimer la loi suivant laquelle l'épaisseur augmente avec l'obliquité. Ainsi l'ensemble des résultats qu'il avait obtenus sur le phénomène curieux des anneaux colorés, conduit à la solution de cette question générale : le rapport de réfraction d'une substance et son épaisseur étant connus, déterminer la proportion de chacune des couleurs simples qu'elle réfléchira sous une obliquité quelconque,

Digitized by Google

ou réciproquement, la couleur étant connue, on en peut déduire le rapport de réfraction si l'épaisseur est donnée, ou l'épaisseur si le rapport de réfraction est connu.

Nous devons ajouter encore qu'il se forme par *transmission* des anneaux semblables à ceux qui sont produits par réflexion, seulement ils sont beaucoup plus faibles. Pour les observer, il suffit de placer le système des verres entre l'œil et la lumière; alors, en opérant sur une couleur simple, il est facile de reconnaître que l'épaisseur de la lame, qui paraît noire par réflexion, est celle qui se trouve colorée par transmission, et *vice versa*. Les anneaux transmis suivent les mêmes lois que les anneaux réfléchis; mais en chaque point d'une lame mince, la teinte transmise est complémentaire de la teinte réfléchie.

168. Des accès de facile réflexion et de facile transmission. — Après avoir établi les lois expérimentales de tous les phénomènes que présentent les lames minces, Newton en avait donné une théorie qui est devenue célèbre sous le nom de *théorie des accès*. Il serait maintenant superflu d'exposer cette théorie dans tous ses détails, parce qu'elle est intimement liée au système de l'émission; mais il nous semble nécessaire d'en faire connaître les principes, pour montrer combien il est difficile de généraliser ou même d'exprimer les faits sans y rien mêler d'hypothétique, et pour montrer aussi qu'un système peut conduire à des résultats importants ou à des rapprochements heureux, même quand il est faux ou incomplet.

Considérant que dans une bulle de savon, dans une lame d'air comprise entre deux verres, ou dans une lame mince quelconque, éclairée par la lumière homogène, on voit périodiquement par réflexion des espaces noirs correspondant aux épaisseurs 0, 2, 4, 6, etc., et des espaces brillants correspondant aux épaisseurs 1, 3, 5, 7, etc., Newton avait exprimé ce fait en disant : la lumière a des *accès de facile réflexion*, car elle se réfléchit quand elle a traversé des épaisseurs 1, 3, 5, 7, etc.; elle a aussi des *accès de facile transmission*, car elle se transmet quand elle a traversé des épaisseurs 0, 2, 4, 6, etc.; et ces deux sortes d'accès sont de même longueur ou de même durée dans le même lieu, puisqu'ils se succèdent périodiquement à des intervalles égaux. Ainsi, en suivant par la pensée un rayon de lumière simple ax (Fig. 17) qui vient de traverser la première surface ss' d'un milieu pour se propager dans son intérieur de a

Digitized by Google

vers x, il faut concevoir que, s'il prend en entrant un accès de facile transmission, cet accès ira croissant de a en m, où il atteindra son maximum, puis deviendra décroissant de m en b; alors commencera l'accès de facile réflexion, qui atteindra son maximum en n, et qui sera décroissant de n en c; puis reviendra un nouvel accès de transmission passant successivementt par les mêmes phases ou périodes de c en d, et ensuite un accès de facile réflexion de d en e, etc., etc. L'espace que parcourt le rayon pendant la durée d'un accès est la *longueur de l'accès;* toutes ces longueurs ab, bc, etc., sont égales entre elles.

Cela posé, si le milieu dont la première surface est en ss' n'a qu'une épaisseur moindre que ab, le rayon pourra passer outre, parce qu'il est dans un accès de facile transmission à l'instant où il touche la seconde surface, et il passera d'autant plus facilement qu'il sera plus près du milieu de son accès de transmission. Ce qui arrive pour une épaisseur moindre que ab, arrive pareillement et par la même raison pour les épaisseurs comprises entre ac et ad, ae et af, etc. Voilà pourquoi une lame mince est noire sous l'incidence perpendiculaire, quand son épaisseur est moindre que la longueur d'un accès, ou quand son épaisseur est égale à deux fois, quatre fois, six fois cette longueur, etc. Au contraire, si l'épaisseur de la lame est égale à une fois, trois fois, cinq fois, sept fois la longueur de l'accès, etc., elle paraîtra vivement colorée, parce qu'au moment où le rayon touche la seconde surface, il est dans un accès de facile réflexion et se trouve par conséquent réfléchi.

Dans la même substance, la longueur des accès augmente avec l'obliquité ; et dans les diverses substances, elle change en raison inverse des indices de réfraction.

Telle est la théorie ou plutôt l'ingénieuse hypothèse au moyen de laquelle Newton a enchaîné avec une rigueur surprenante tous les phénomènes que présentent les lames minces.

Pendant longtemps on a regardé cette hypothèse comme une vérité physique incontestable. N'est-elle pas, disait-on, l'expression générale d'un fait? n'est-il pas certain que la lumière est alternativement transmise et réfléchie? Cela est vrai; mais en affirmant que la lumière est alternativement transmise et réfléchie, on fait explicitement deux hypothèses : savoir, que la lumière est alternativement transmise à certaines épaisseurs, et qu'elle est alternativement réfléchie à d'autres épaisseurs; et de

Digitized by Google

plus, on fait encore implicitement une troisième hypothèse, savoir, que la première surface n'a aucune part dans le phénomène. Or, nous allons voir qu'il n'y a en effet ni transmission ni réflexion alternatives, et que les anneaux sont produits par le concours de deux réflexions uniformes qui se font à la première et à la seconde surface des lames minces.

169. Théorie des phénomènes des lames minces dans le système des ondulations. — Fresnel a présenté cette théorie d'une manière si simple et si concise que je me fais un devoir de conserver ici ses propres expressions. Il établit d'abord un principe fondamental sur le sens du mouvement dans les ondes réfléchies, et il explique ensuite la formation des anneaux.

Sur le sens du mouvement dans les ondes réfléchies. — « Lorsqu'un ébranlement se propage dans un milieu d'une élasticité et d'une densité uniformes, il ne revient jamais sur ses pas; et en se communiquant à des tranches nouvelles, il laisse les tranches précédentes dans un repos absolu. C'est ainsi qu'une bille d'ivoire qui vient en frapper une autre de masse égale lui communique tout son mouvement et reste en repos après le choc. Lorsque la seconde bille a plus de masse que la première, la nouvelle vitesse dont celle-ci est animée la porte en sens contraire de son premier mouvement; et lorsque la seconde bille a moins de masse que la première, celle-ci continue à se mouvoir dans le même sens; ainsi les nouvelles vitesses de la première bille, après le choc, sont de signes contraires dans les deux cas. Ceci peut aider à concevoir ce qui se passe lorsqu'une onde arrive à la surface de contact de deux milieux élastiques de densités différentes : la tranche infiniment mince du premier milieu, qui touche au second, et que nous pouvons assimiler à la première bille, ne reste pas en repos après avoir mis en mouvement la tranche contiguë du second milieu, à cause de la différence de leur masse, et il y a réflexion; mais la nouvelle vitesse dont la tranche du premier milieu est animée après le choc, et qui se communique successivement aux tranches précédentes du même milieu, doit changer de signe selon que la tranche du second milieu a plus ou moins de masse que celle du premier, c'est-à-dire selon que celui-ci est moins dense ou plus dense que le second. Ce principe important, que M. Young a découvert par les considérations que nous venons d'exposer, résulte également des formules que M. Poisson a déduites

Digitized by Google

d'une analyse savante et rigoureuse : appliqué à la réflexion de la lumière, il nous apprend que, selon qu'une onde lumineuse est réfléchie en dedans ou en dehors du milieu le plus dense, la vitesse d'oscillation est positive ou négative; ainsi, tous les mouvements oscillatoires correspondants seront de signes contraires dans les deux cas.

« Cela posé, revenons au phénomène des anneaux colorés, et supposons, pour simplifier les raisonnements, qu'on observe la lumière réfléchie sous l'incidence perpendiculaire, ou du moins dans une direction qui s'en écarte très-peu; considérons un des systèmes d'ondes envoyé par l'objet éclairant sur la première surface de la lame d'air, c'est-à-dire sur la seconde surface du verre supérieur; ce que nous dirons de ce système d'ondes pourra s'appliquer à tous les autres : au moment où il arrive à la surface de séparation du verre et de l'air, il éprouve une réflexion partielle qui diminue un peu l'intensité de la lumière transmise dans la lame d'air, et fait naître en dedans du premier verre un autre système d'ondes dont l'intensité est, comme on sait, très-inférieure à celle de la lumière transmise; en sorte que celle-ci, étant fort peu affaiblie par cette première réflexion, produit, en arrivant à la seconde surface de la lame d'air, un second système d'ondes réfléchies d'une intensité presque égale à celle des ondes qui proviennent de la première réflexion : voilà pourquoi leur interférence produit des couleurs si vives dans la lumière blanche, et des anneaux brillants et obscurs si prononcés dans une lumière homogène. Les deux surfaces de la lame d'air étant sensiblement parallèles dans le voisinage du point de contact où se forment les anneaux colorés, les deux systèmes d'ondes suivront la même route; mais celui qui a été réfléchi à la seconde surface se trouvera en retard relativement à l'autre, et d'une quantité égale au double de l'épaisseur de la lame d'air, qu'il a traversée deux fois. Il faut remarquer en outre qu'il existe entre eux une autre différence, c'est que le premier a été réfléchi en *dedans* du verre, ou du milieu le plus dense, tandis que l'autre l'a été en *dehors* du verre inférieur; d'où résulte, d'après le principe établi ci-dessus, une opposition dans les mouvements oscillatoires. Ainsi, lorsque, en raison de la différence des chemins parcourus, les deux systèmes d'ondes devraient être d'accord, c'est-à-dire exécuter tous leurs mouvements oscillatoires dans le même sens,

nous conclurons qu'ils sont au contraire en discordance complète; et réciproquement, lorsque la différence des chemins parcourus indiquera une discordance complète, nous en conclurons que leurs mouvements oscillatoires s'accordent parfaitement. Cela posé, il est aisé de déterminer la position des anneaux obscurs et brillants.

Et d'abord, le point du contact, où l'épaisseur de la lame d'air est nulle, ne produisant aucune différence de marche entre les deux systèmes d'ondes, devrait établir un accord parfait entre leurs vibrations; ainsi, puisque, en raison de l'opposition de signe, c'est le contre-pied qu'il faut prendre, leurs vibrations seront en discordance complète, et le point de contact, vu par réflexion, présentera une tache noire. A mesure qu'on s'en éloigne, l'épaisseur de la lame d'air augmente. Arrêtons-nous au point où son épaisseur est égale à $\frac{1}{4}$ d'ondulation; la différence des chemins parcourus sera une demi-ondulation, qui répond à une discordance complète, et par conséquent il y aura accord parfait entre les deux systèmes d'ondes; ce sera donc le point le plus éclairé du premier anneau brillant. Lorsque l'épaisseur de la lame d'air sera la moitié d'une ondulation, la différence des chemins parcourus étant égale à une ondulation, qui répond à l'accord parfait, il y aura discordance complète, et ce point sera le milieu d'un anneau obscur. Il est facile de voir en général, par les mêmes raisonnements, que les points les plus noirs des anneaux obscurs répondent aux épaisseurs de la lame d'air, égales à

$$0, \frac{2}{4}d, \frac{4}{4}d, \frac{6}{4}d, \frac{8}{4}d, \frac{10}{4}d, \text{ etc.},$$

et les points les plus éclairés des anneaux brillants aux épaisseurs

$$\frac{1}{4}d, \frac{3}{4}d, \frac{5}{4}d, \frac{7}{4}d, \frac{9}{4}d, \frac{11}{4}d, \text{ etc.},$$

d étant la longueur d'une ondulation luminense dans l'air. Si l'on prend pour unité le quart de cette longueur, les épaisseurs de la lame d'air répondant aux *maxima* et *minima* de lumière réfléchie, donnent les nombres suivants :

Anneaux obscurs : 0, 2, 4, 6, 8, 10, etc.
Anneaux brillants : 1, 3, 5, 7, 9, 11, etc.

« On voit que cette unité, ou le quart d'une ondulation lumineuse, est précisément la longueur de ce que Newton appelle les *accès des molécules lumineuses*. Ainsi, en multipliant par 4 les mesures qu'il en a données, pour les sept principales espèces de rayons simples, on a les longueurs correspondantes de leurs ondulations. On trouve de cette manière les mêmes résultats qu'en déduisant les longueurs d'ondulation de la mesure des franges produites par deux miroirs, ou des phénomènes variés de la diffraction (voy. les *tableaux des pages* 315 *et* 344). Cette identité numérique, que M. Young a le premier remarquée, établit entre les anneaux colorés et la diffraction de la lumière une relation intime qui avait échappé jusqu'alors aux physiciens guidés par le système de l'émission, et ne pouvait être indiquée que par la théorie des ondulations.

« D'après l'expérience de M. Arago sur le déplacement qu'éprouvent les franges produites par l'interférence de deux faisceaux lumineux, lorsque l'un des deux a traversé une lame mince, nous avons vu que les ondulations lumineuses étaient raccourcies dans cette lame, suivant le rapport du sinus de réfraction au sinus d'incidence, pour le passage de la lumière de l'air dans la lame. Ce principe est général et s'étend à tous les corps réfringents, de quelque nature qu'ils soient : ainsi, par exemple, la longueur d'ondulation de la lumière dans l'air est à la longueur d'ondulation dans l'eau, comme le sinus de l'angle d'incidence des rayons, qui passent obliquement de l'air dans l'eau, est au sinus de leur angle de réfraction. Par conséquent, si l'on introduit de l'eau entre les deux verres en contact qui présentent des anneaux colorés, la lame d'air étant remplacée par une lame d'eau, dans laquelle les ondulations lumineuses deviennent plus courtes, suivant le rapport que nous venons d'énoncer, les épaisseurs de ces deux lames qui réfléchissent les mêmes anneaux, seront entre elles dans le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction pour le passage de la lumière de l'air dans l'eau. C'est précisément le résultat que Newton avait trouvé par l'observation, en comparant les diamètres des anneaux produits dans les deux cas, d'où il déduisait, par le calcul, les épaisseurs correspondantes. Cette relation remarquable entre les phénomènes de la diffraction, de la réfraction et des anneaux colorés, qui ne se rattache en rien à l'hypothèse de l'émission, aurait pu être annoncée d'avance par la théorie

des ondulations, d'après laquelle les sinus des angles d'incidence et de réfraction doivent être nécessairement proportionnels aux vitesses de propagation ou aux longueurs d'ondulation de la lumière dans les deux milieux.

« Après avoir rendu compte de la formation des anneaux réfléchis par l'interférence des rayons réfléchis à la première et à la seconde surface de la lame d'air, M. Young a démontré que les anneaux beaucoup plus faibles qu'on voit par transmission, résultent de l'interférence des rayons transmis directement avec ceux qui ne l'ont été qu'après deux réflexions consécutives dans la lame mince, et qu'ils devaient être en conséquence complémentaires des anneaux réfléchis, conformément à l'expérience. Nous croyons inutile de donner cette explication qui est semblable à la précédente; nous ferons seulement remarquer que l'extrême pâleur des anneaux transmis sous l'incidence perpendiculaire, tient à la grande différence d'intensité des deux systèmes d'ondes qui les produisent.

« Nous ne traiterons pas non plus des anneaux réfléchis sous des incidences obliques, et nous nous contenterons de dire que la théorie explique pourquoi leur diamètre augmente avec l'obliquité, et que la formule très-simple à laquelle elle conduit représente les faits avec exactitude, du moins tant que les obliquités ne sont pas trop grandes : lorsque les rayons qui pénètrent dans la lame d'air sont très-inclinés, les résultats du calcul ne s'accordent plus avec les mesures de Newton. Mais il est probable que cette anomalie tient à ce que les lois ordinaires de la réfraction, d'après lesquelles la formule est calculée, éprouvent quelques modifications dans le passage très-oblique des rayons entre deux surfaces aussi rapprochées.

« Nous n'avons considéré jusqu'à présent que les anneaux produits par une lumière simple; mais il est aisé d'en conclure ce qui doit avoir lieu dans la lumière blanche, par des raisonnements analogues à ceux que nous avons déjà faits précédemment pour les franges de l'expérience des deux miroirs. On peut d'ailleurs trouver cette analyse du phénomène, exposée avec le plus grand détail dans l'optique de Newton, qui, le premier, a démontré que l'effet produit par la lumière blanche résultait toujours de la réunion des effets divers des rayons colorés dont elle se compose. »

Il résulte de cette théorie, dont les principes sont si claire-

Digitized by Google

ment posés par Fresnel, que sous les incidences obliques les épaisseurs de la lame d'air doivent être proportionnelles à séc r; en désignant par r l'angle que, dans la lame mince, le rayon lumineux fait avec la normale. Or, les mesures prises par Newton ne s'accordaient pas avec cette conclusion, du moins pour les grandes obliquités; il en résultait une incertitude sérieuse, à laquelle Fresnel fait allusion dans l'avant-dernier paragraphe que nous venons de citer. MM. La Provostaye et Desains ont fait un travail important sur ce sujet et démontré par des mesures multipliées, d'une rare précision, que Newton avait été induit en erreur à cause de l'imperfection de ses procédés, et que les épaisseurs de la lame d'air sont bien effectivement proportionnelles à séc r, jusqu'aux plus grandes obliquités (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXVII, p. 423, ann. 1849).

Il importe de faire comprendre au moins ce qui caractérise la méthode de MM. La Provostaye et Desains, parce qu'elle peut être appliquée à d'autres phénomènes. Une glace est disposée sur le chariot d'une machine à diviser, les précautions sont prises pour que le mouvement de la vis la déplace en la laissant parfaitement horizontale; une lentille plan convexe d'environ 12 mètres de rayon, est posée sur la glace par le sommet de sa courbure, on s'en assure par l'horizontalité de sa face plane. Les anneaux sont formés autour de ce point de contact, avec la lumière simple de l'alcool salé, qui alimente une lampe à double courant d'air; on peut utilement interposer une feuille de papier blanc entre la flamme et les verres, pour rendre le champ de lumière plus fixe et plus uniforme; alors on peut compter jusqu'à 60 périodes d'anneaux sombres et brillants. On vise à ces anneaux avec une lunette qui est mobile dans un plan vertical perpendiculaire à l'axe de la vis; ainsi, en tournant la tête de la vis pour faire marcher les verres, on amène successivement sous le fil de la lunette, les deux points opposés d'un même anneau; la distance de ces points ou le diamètre de l'anneau est donc donné par l'arc que la tête de la vis a parcouru, sans qu'il y ait à faire aucune correction. Jamais les lois des lames minces n'ont été vérifiées par des mesures aussi précises.

170. Couleurs produites par les plaques épaisses. — Un rayon solaire entre dans la chambre noire par une ouverture ronde de 4 ou 5 millimètres de diamètre, il tombe sur un miroir

concave *mm'* (Fig. 18) de verre étamé, qui le renvoie exactement dans la direction d'incidence, et l'on distingue alors autour de l'ouverture, sur un carton blanc disposé à cet effet, une série d'anneaux très-éclatants. Ce phénomène, qui est l'un des plus beaux de l'optique, a été découvert et observé par Newton.

Quand la lumière incidente est une couleur simple, le rouge, par exemple, les anneaux sont alternativement sombres et rouges, sans aucune autre nuance; on peut alors en compter jusqu'à douze ou quinze, si l'on a pris toutes les précautions convenables pour faire les ténèbres complètes dans le lieu de l'observation. Quand la lumière incidente est blanche, les anneaux présentent toutes les nuances des anneaux formés par les lames minces.

Ces anneaux prennent leur plus grande intensité quand la distance du miroir au carton est égale au rayon du miroir, ou, en d'autres termes, quand l'image réfléchie de l'ouverture retombe sur l'ouverture elle-même et lui est précisément égale en grandeur. Pour les distances moindres ou plus grandes entre le miroir et le carton, les couleurs des anneaux paraissent beaucoup plus faibles, et finissent même par s'effacer complétement.

Cependant, avec un miroir net et bien poli, les anneaux sont toujours plus ou moins pâles, et pour leur donner le plus vif éclat qu'ils puissent prendre, il faut ternir un peu la première surface du miroir, soit en soufflant dessus, soit en y projetant quelque poudre très-fine, comme de la farine, soit enfin en la couvrant d'une légère couche de lait étendu d'eau qui se sèche et reste adhérente. Cette circonstance singulière avait échappé à Newton.

Lorsqu'on détourne un peu le miroir de la position que nous venons d'indiquer, de telle sorte que l'image réfléchie de l'ouverture tombe à quelque distance de l'ouverture elle-même, par exemple, à trois ou quatre centimètres ou davantage, on distingue encore des anneaux circulaires (Fig. 19), au point d'en compter plusieurs ordres; mais leur centre commun est alors au milieu de la ligne qui joint l'ouverture à son image, et tout autour de ce centre paraît une tache plus ou moins large qui change d'aspect lorsqu'on porte plus ou moins loin l'image de l'ouverture réfléchie par le miroir. Elle est alternativement

Digitized by Google

sombre et brillante dans la lumière homogène, tandis que dans la lumière blanche elle passe rapidement par une infinité de nuances.

Telles sont les apparences générales de ce phénomène que l'on nomme *phénomène des plaques épaisses*, parce que la grandeur des anneaux dépend de l'épaisseur du miroir, son rayon de courbure restant le même.

Par un grand nombre d'expériences habilement variées sur des miroirs de différents rayons ou de différentes épaisseurs, et par des mesures précises des anneaux de diverses couleurs, Newton parvint à établir les lois suivantes :

1° Dans une lumière homogène quelconque, les carrés des diamètres suivent, pour les anneaux brillants, la série des nombres pairs 0, 2, 4, 6, etc., et pour les anneaux sombres, la série des nombres impairs 1, 3, 5, 7, etc.

2° Avec un même miroir, placé à la même distance, les diamètres des anneaux de même ordre dans les différentes couleurs vont en décroissant, depuis le rouge jusqu'au violet, et leurs rapports sont les mêmes que pour les anneaux formés dans les lames minces.

3° Les diamètres des anneaux de même couleur et de même ordre, formés avec des miroirs de même rayon et de différente épaisseur, sont réciproquement proportionnels aux racines carrées des épaisseurs des miroirs.

Ces lois, purement expérimentales, sont d'une exactitude remarquable. Je les ai autrefois vérifiées avec M. Biot, non-seulement sur des miroirs à faces concentriques, mais encore sur plusieurs miroirs dont les deux faces avaient des rayons de courbures très-différents.

Voici une autre manière de produire le phénomène des plaques épaisses; elle fut imaginée par le duc de Chaulnes, en 1755 (*Mémoires de l'Académie des sciences*). Au miroir de verre on substitue un miroir de métal (Fig. 20), en le plaçant aussi pour que l'ouverture coïncide avec son centre ou à peu près; mais à quelque distance au-devant de sa surface on adapte une lame parallèle, telle, par exemple, qu'une lame de verre, de mica ou de chaux sulfatée, avec la précaution de ternir avec du lait l'une ou l'autre de ses faces. Alors on obtient des anneaux parfaitement semblables aux précédents, et qui sont par conséquent soumis aux mêmes lois. L'épaisseur du miroir est ici la couche

Digitized by Google

d'air comprise entre la lame transparente et la surface concave du réflecteur, et il est facile de la varier à volonté.

Il se présente enfin un troisième moyen bien plus simple de reproduire encore le même phénomène. J'eus occasion de l'observer en 1816 (*Ann. de Chim. et de Phys.*, 1816). On dispose un miroir concave de métal comme dans l'expérience du duc de Chaulnes, et au lieu d'interposer au-devant de sa surface une lame transparente, on y ajuste un *écran opaque* percé d'une ouverture quelconque, assez petite seulement pour que ses bords rencontrent les rayons incidents et par suite les rayons réfléchis (Fig. 21); alors, on distingue des anneaux autour du carton qui est à l'ouverture du volet, comme dans les expériences de Newton et du duc de Chaulnes; seulement, ils sont moins éclatants et par conséquent moins nombreux. L'irrégularité de l'ouverture de l'écran n'altère pas sensiblement la forme circulaire de ces anneaux; ils restent les mêmes pour une ouverture ronde, carrée, triangulaire, ou pour une ouverture en rectangle étroit et très-allongé. J'ai même remarqué qu'un simple bord rectiligne, présenté au faisceau près des miroirs, détermine la formation des anneaux; mais alors on ne distingue nettement qu'une moitié de leur circonférence.

171. Newton avait su tirer de la théorie des accès une explication des couleurs produites par les miroirs de verre. M. Biot avait étendu cette explication aux couleurs produites par les miroirs métalliques combinés avec une lame transparente, suivant le procédé du duc de Chaulnes; mais pour rattacher à la même théorie les effets que j'avais obtenus en plaçant devant les miroirs des écrans opaques percés de diverses ouvertures, il fallait avoir recours à des hypothèses compliquées et infiniment peu probables. Au contraire, dans le système des ondulations, tous ces phénomènes de même ordre et de même apparence s'expliquent par le même principe, comme nous allons l'indiquer.

Soient c le centre du miroir (Fig. 22); $cb = r$, et $ca = r'$, les rayons de courbure de sa seconde et de sa première surface; $e = ab = r - r'$, son épaisseur. Au point a, sur la première surface, la lumière éprouve une *diffusion* par l'imperfection du poli; les rayons qui en résultent tombent sur la seconde surface en divergeant, comme s'ils partaient du point a lui-même, et ils se réfléchissent sur cette seconde surface comme s'ils partaient d'un certain point l dont la position se détermine aisément. En

Digitized by Google

effet, le point l est le foyer conjugué du point a, par rapport à la surface b, et la formule des miroirs donne :

$$bl = \frac{er}{2e - r} \quad \text{ou} \quad bl = -e,$$

parce que $2e$ peut être négligé par rapport à r. Ces rayons réfléchis viennent tomber sur la première surface ap, où ils se réfractent pour sortir dans l'air, et, après leur réfraction, ils sont comme s'ils partaient d'un certain point t dont la position se détermine par la formule des lentilles d'une épaisseur indéfinie, qui donne :

$$at = \frac{2er'}{nr' + 2e(1-n)} \quad \text{ou} \quad at = \frac{2e}{n}.$$

Au sortir de la surface ap, ces rayons éprouvent une nouvelle diffusion pareille à celle qu'ils avaient éprouvée en entrant, et ils divergent dans tous les sens; mais leur intensité est beaucoup plus grande pour les petites inclinaisons.

Les rayons émergents, qui échappent à la réflexion et à la réfraction régulières, sont donc de deux sortes : les uns, qui n'ont éprouvé que la diffusion d'entrée, et qui sont dans le même état que s'ils avaient parcouru le chemin $at + tm$; les autres, qui ont éprouvé la double diffusion d'entrée et de sortie, et qui sont dans le même état que s'ils avaient suivi le chemin $at + ta + am$. Comme leurs vibrations étaient concordantes au point a d'où nous comptons leur départ, il en résulte qu'au point m, sur le carton qui environne le trou d'incidence, elles seront concordantes ou discordantes, suivant que la différence des chemins parcourus fera un nombre pair ou un nombre impair de demi-ondulations. D'ailleurs, tout étant symétrique autour du faisceau central ca, il en résultera évidemment une série d'anneaux sombres et brillants ayant tous le point c pour centre, et dont les diamètres sont faciles à trouver. En effet, la différence des chemins parcourus est $at + ta + am - at - tm$, ou $at + am - tm$.

Nous avons déjà vu que $at = \frac{n}{2e}$, et en appelant y le demi-diamètre inconnu cm de l'anneau, le triangle cam donne :

$$am = \sqrt{(r-e)^2 + y^2} = r - e + \frac{y^2}{2(r-e)}.$$

Le triangle *ctm* donne pareillement :

$$tm = \sqrt{\left(r + \frac{2e}{n} - e\right)^2 + y^2} = r + \frac{2e}{n} - e + \frac{y^2}{2\left(r + \frac{2e}{n} - e\right)};$$

d'où il résulte approximativement $\frac{ey^2}{nr^2}$ pour la différence des chemins parcourus; et, si on la suppose égale à m fois la longueur λ d'une demi-ondulation, on en déduira définitivement, pour le diamètre $2y$, des anneaux de différents ordres :

$$2y = 2r\sqrt{\frac{m\lambda n}{e}}.$$

En substituant pour m la série des nombres pairs 2, 4, 6, etc., ou la série des nombres impairs 1, 3, 5, etc., on aura la série des anneaux brillants ou celle des anneaux sombres. Cette expression reproduit fidèlement les trois lois énoncées plus haut; on voit de plus qu'elle est indépendante du rayon de courbure de la première surface, conformément à nos expériences : pour l'appliquer aux observations du duc de Chaulnes et à celles que j'ai faites avec des écrans opaques, il suffit de faire $n = 1$, et de prendre pour e la distance de l'écran au miroir.

Dans ce qui précède nous n'avons considéré qu'un pinceau de lumière incidente très-mince, mais il est facile de voir que les mêmes raisonnements s'appliquent à un pinceau de grandeur finie, tel, par exemple, que celui qui arrive au miroir par une ouverture centrale de 4 ou 5 millimètres de diamètre. Alors ce n'est plus la portion intérieure du faisceau incident qui est efficace, c'est surtout sa portion extérieure. Si l'on suppose, par exemple, que l'ouverture ait 5 millimètres de diamètre, la circonférence extérieure du faisceau est de plus de 15 millimètres, et c'est la portion diffuse de cette lumière qui est répartie autour du centre pour y faire les anneaux de différents ordres, qui prennent ainsi beaucoup plus d'éclat que s'ils étaient formés par un pinceau central très-mince. La grandeur de l'ouverture n'est donc pas tout à fait sans influence sur le diamètre des anneaux.

Quant à la distance du miroir à laquelle les anneaux prennent l'éclat le plus vif, il me semble qu'elle peut varier dans des li-

Digitized by Google

mites assez étendues; en la représentant par d, la formule du diamètre des anneaux la plus générale est :

$$2y = 2d\sqrt{\frac{m\lambda n}{e}}.$$

On pourra aisément étendre ces formules au cas de la réflexion oblique, et rendre compte de toutes les apparences que présentent alors les anneaux, soit avec la lumière simple, soit avec la lumière composée.

Des plaques épaisses.

Lorsque les anneaux des plaques épaisses sont produits dans les circonstances les plus convenables, il est si facile de les mesurer avec exactitude qu'ils deviennent un moyen très-simple d'obtenir les longueurs d'ondulations correspondantes aux diverses lumières. En voici un exemple tiré de la nombreuse série d'expériences que j'ai faites autrefois avec M. Biot sur ce sujet, et qui sont consignées dans son *Traité de Physique*, tom. IV, pag. 743; Paris, 1816. L'épaisseur du verre étant 2,34 et la distance du carton 2178, nous avons trouvé 63 .... 107 et 143 pour les diamètres des anneaux noirs des trois premiers ordres, et 88....125 pour ceux des deux premiers lucides, la lumière étant le rouge extrême, et le millimètre étant pris pour unité; en calculant les valeurs de λ qui en résultent, on trouve en millionièmes de millimètre, 324....316....312....319....334, dont la moyenne est 321, qui donne 642 pour la longueur de l'onde entière, au lieu de 645 qui appartient au rouge le plus extrême.

172. Les principes que nous venons de développer servent à expliquer beaucoup d'autres phénomènes analogues, dont nous nous bornerons à citer quelques exemples.

M. Babinet a observé qu'un faisceau de lumière convergente donne des anneaux lorsqu'on vient interposer sur sa route une lame réfringente dont les surfaces sont légèrement enduites d'eau laiteuse séchée ou de vernis de dextrine (Fig. 23) : la lumière qui a été rendue diffuse par la première surface va interférer avec celle de la même onde qui a été rendue diffuse par la deuxième surface, et le diamètre $2y$ des anneaux est ici donné par la formule :

$$2y = 2d\sqrt{\frac{2m\lambda n}{e}}.$$

Le facteur $\sqrt{2}$ provient de ce qu'ici il n'y a pas de réflexion intérieure, et que la lumière ne traverse qu'une fois l'épaisseur *e* au lieu de la traverser deux fois. En substituant à la lame réfringente deux lames minces de mica, parallèles et maintenues à la distance *e* l'une de l'autre, on obtient encore le même effet, et, pour avoir les diamètres, il suffit de faire $n = 1$ dans la formule précédente.

Couleurs produites par une lame épaisse et une surface plane réfléchissante. — Une lame de verre *ab*, à faces parallèles ou très-peu inclinées, ayant plusieurs millimètres d'épaisseur, est disposée (Fig. 24) au-dessus d'une lame polie de métal *ml*, et à très-peu près parallèlement; au travers de la lame *ab* on regarde sur *ml* l'image réfléchie d'une ouverture faite au volet de la chambre noire, et éclairée seulement par la lumière des nuées; cette image est colorée de nuances plus ou moins vives, dans lesquelles on distingue surtout le rouge et le vert; ces couleurs sont produites par l'interférence des rayons qui passent directement, et des rayons qui ont éprouvé une réflexion dans la plaque.

Couleurs produites par deux lames d'égale épaisseur qui sont légèrement inclinées entre elles. — On regarde l'ouverture de la chambre noire au travers d'un système de lames égales et parallèles, dont la première est perpendiculaire au rayon incident, tandis que la deuxième est légèrement inclinée. On distingue alors plusieurs images de l'ouverture : la première, qui est l'image directe, est vive et sans couleurs; les autres, qui sont plus ou moins déviées, sont faibles et sillonnées de bandes plus ou moins larges qui présentent toutes les couleurs des anneaux.

On voit (Fig. 25) un petit appareil qui est destiné à régulariser ce phénomène. A l'une des extrémités d'un tube de 25 à 30 centimètres de longueur est une fente d'environ 1 centimètre de largeur qui laisse passer la lumière des nuées, et à l'autre extrémité est le système des deux plaques à faces parallèles, dont l'une est fixe, tandis que l'autre, mobile à charnière, se presse, au moyen du bouton *b*, de manière à faire avec la première un angle de plus en plus petit; pendant que cet angle diminue, les franges deviennent plus larges et moins nombreuses : on a indiqué la marche des rayons pour faire voir ceux qui interfèrent.

173. **Ériomètre du docteur Young.** — Lorsqu'on regarde la

flamme d'une bougie au travers d'une petite houppe de fibres déliées et entre-croisées de mille manières, on voit autour de la flamme des anneaux colorés imitant à peu près les couronnes que l'on observe autour du soleil ou de la lune. Des brins de laine, de soie ou de coton, des poils d'animaux, des fils de toute espèce, produisent ce phénomène avec beaucoup d'éclat. Il en est de même encore des poussières fines qui sont étalées sur une lame de verre en couches très-minces. Le docteur Young, qui a le premier observé ces phénomènes avec méthode, s'en est ingénieusement servi pour construire un instrument destiné à mesurer les épaisseurs des fibres déliées ou les diamètres des globules très-petits, comme les globules du sang, du lait ou de la fécule. C'est cet instrument qu'il a appelé *ériomètre*.

L'ériomètre se compose d'un tube dans lequel se meut une plaque circulaire de carton ou de métal noirci, ayant à son centre une ouverture ronde d'environ un demi-millimètre : autour de cette ouverture, à la distance de huit ou dix millimètres, on perce un certain nombre de trous aussi fins qu'il est possible. En plaçant l'œil derrière cette plaque, pour regarder une flamme vive, comme celle d'une lampe de Carcel, on distinguera nettement l'ouverture centrale et les petits trous très-fins; rangés sur une même circonférence, ceux-ci forment le repère sur lequel on doit amener en coïncidence l'un des anneaux des corps déliés soumis à l'expérience. Pour cela on dispose ces corps à l'extrémité du tube du côté de l'œil, et, au travers de leur tissu, l'on regarde l'ouverture centrale qui paraît environnée d'un halo. Si l'anneau que l'on a choisi pour servir à la comparaison des mesures enveloppe la circonférence des repères, on rapproche la plaque, et on l'éloigne dans le cas contraire; puis enfin, quand la coïncidence est bien établie entre les repères et l'anneau, on lit sur le tube la distance de la plaque. Le docteur Young admet que les diamètres des corps déliés sont en raison inverse de ces distances. Il suffit, par conséquent, d'après cette règle, d'avoir la grandeur de l'un de ces corps pour en déduire celle de tous les autres.

CHAPITRE IX.

De la vitesse de la lumière.

§ 1. *Historique.*

174. En consacrant ici un chapitre aux déterminations de la vitesse absolue de la lumière et de ses vitesses relatives dans les milieux diversement réfringents, mon premier soin doit être de faire comprendre toute l'importance de cette question, par rapport aux théories de l'émission et des ondulations, et toutes les difficultés, longtemps insurmontables, qui semblaient s'opposer à ce qu'elle fût résolue d'une manière nette et décisive. M. Arago a contribué plus que personne à cette solution, qui fera époque dans l'histoire de l'optique : il y a contribué par une ancienne expérience sur l'interférence ou la non-interférence des rayons polarisés (*Lumière polarisée*, chap. II), d'où il a déduit avec Fresnel les moyens de mesurer les vitesses relatives des rayons ordinaires et extraordinaires ; il y a contribué plus récemment, en 1838, en publiant la méthode qu'il avait imaginée pour arriver à une solution directe. Cette publication a excité à un haut degré le zèle d'un grand nombre d'expérimentateurs, et, c'est à cette circonstance que nous devons les travaux si remarquables de M. Foucault et de M. Fizeau. M. Arago ayant publié dans nos *Comptes rendus* (séance du 29 avril 1850) un historique qui retrace l'état de la question, ses difficultés, ses progrès, je me fais un devoir de reproduire ici cet article ; c'est la meilleure introduction par laquelle je puisse préparer le lecteur aux expériences dont j'essayerai ensuite de rendre compte.

« A la fin de 1838, dit M. Arago, je rendis compte à l'Académie d'un projet d'expérience que j'avais imaginé pour résoudre directement et définitivement cette question, toujours débattue entre les physiciens : la lumière est-elle une matière émise par les corps rayonnants, ou le résultat de la vibration d'un milieu très-rare et très-élastique qu'on est convenu d'appeler l'*éther*?

« Les circonstances m'amènent aujourd'hui à traiter la question au point de vue historique.

« M. Wheatstone était parvenu très-ingénieusement, à l'aide d'un appareil dans lequel figurait, pour la première fois, un appareil rotatif, à déterminer la vitesse de propagation de l'électricité. Cette belle méthode m'avait paru un titre suffisant pour que M. Wheatstone occupât un rang distingué dans la liste des candidats à une place de correspondant vacante dans la section de physique. Les membres de la section avec lesquels je me trouvai en désaccord à ce sujet, prétendaient que la méthode que j'exaltais, disaient-ils, outre mesure, ne pourrait pas s'appliquer à d'autres recherches que celles dont M. Wheatstone avait déjà présenté les résultats[1].

« Je m'engageai à prouver, contrairement à l'opinion de mes confrères, que le miroir rotatif du physicien anglais servirait à la détermination des vitesses comparatives de la lumière dans les liquides et dans l'air, c'est-à-dire, à la solution d'une des plus difficiles questions de la philosophie naturelle.

« Tel fut l'objet de la note imprimée dans le *Compte rendu* de la séance du 3 décembre 1838.

« Cette note établissait que, dans les hypothèses fort admissibles sur les déviations angulaires susceptibles d'être observées avec une lunette ordinaire, il ne serait pas impossible de déterminer la vitesse comparative de la lumière dans le carbure de soufre et dans l'air, sans recourir à une longueur de tube exagérée, et à un miroir faisant plus de 1000 tours par seconde. Or, le miroir dont s'était servi M. Wheatstone faisait déjà 800 tours dans le même intervalle de temps.

« Il était évident que dans ce système d'observation, et pour un écartement angulaire donné, la longueur du tube renfermant le liquide devait être d'autant plus courte, que le mouvement de rotation du miroir serait plus rapide. C'est pour cela que je m'étais attaché à suppléer à ce mouvement de rotation, qui ne peut pratiquement dépasser certaines limites, en combinant plusieurs miroirs rotatifs.

« Les deux rayons tombant, l'un à travers le liquide, l'autre

[1] Je ne crois pas avoir été de ceux qui, à cette époque, ont eu l'occasion de discuter ce sujet avec M. Arago; assurément, sans lui faire l'objection dont il s'agit, je n'aurais pas manqué de lui dire que j'ai toujours regardé la méthode de M. Wheatstone comme très-ingénieuse, très-propre à résoudre beaucoup de questions importantes, mais très-peu propre à résoudre celle de la vitesse de propagation de l'électricité.

à travers l'air sur un premier miroir rotatif, forment un certain angle; cet angle est doublé lorsque les rayons tombent sur un second miroir tournant dans un sens convenable avec la même vitesse; l'angle est triplé si les rayons tombent sur un troisième miroir tournant, et ainsi de suite. On peut ainsi par la multiplication des miroirs rotatifs, arriver au même résultat que si un miroir unique tournait avec une vitesse double, triple..., de celle qu'il est possible d'obtenir avec sûreté sans détruire la denture des roues et sans détremper les axes.

« Mon ami, M. Breguet fils, se chargea de réaliser cette conception, par un mécanisme dans lequel toutes les communications de mouvement s'effectuent à l'aide d'engrenages. Il mit en œuvre une disposition particulière de la denture dont la première idée appartient à White. On a pu voir le système des trois mouvements déjà exécutés, à l'une des anciennes expositions des produits de l'industrie.

« En visant à l'image réfléchie par le miroir qu'entraînait le troisième rouage, les effets observés devaient être identiques avec ceux qu'aurait fournis un miroir rotatif unique faisant 3000 tours par seconde. Dès ce moment le succès de l'expérience projetée était mis hors de doute; on pouvait regretter seulement que par trois réflexions successives sur trois miroirs différents, la lumière dût éprouver un affaiblissement notable. Il était donc à désirer qu'on arrivât au résultat par une seule réflexion; c'est à quoi les expériences dont je vais rendre compte parurent conduire.

« Dans ses recherches sur les causes qui empêchaient de faire tourner un miroir avec plus de 1000 tours par seconde, M. Breguet s'avisa de décharger le dernier axe du poids du miroir qu'il supportait, de faire tourner l'axe tout seul, et il réussit, non sans étonnement, à faire faire à cet axe 8000 tours par seconde. L'obstacle qui empêchait de faire tourner le même axe, lorsqu'il portait le miroir, avec une vitesse de plus de 1000 tours par seconde, parut évident : c'était, devait-on penser, la résistance de l'air. Je crus moi-même à l'existence de cette cause, et toutes nos pensées se portèrent sur les moyens de faire tourner les miroirs dans le vide. On construisit aussitôt un récipient en métal, destiné à contenir l'appareil rotatif. Ce récipient était percé de plusieurs ouvertures, dont l'une devait donner entrée aux rayons de lumière ayant traversé les deux colonnes d'air et de liquide.

En face des autres auraient été les objectifs des lunettes destinées à observer les deux rayons réfléchis par le miroir rotatif. Des communications convenables étaient établies, par l'intermédiaire de boîtes à étoupes, entre l'appareil et le poids moteur. Un tube particulier mettait l'intérieur du récipient en communication avec une machine pneumatique.

« Tout cela était disposé, établi sur une colonne en pierre dans la salle de la *Méridienne* de l'Observatoire. Il ne restait plus qu'à faire l'observation.... Le miroir démentant toutes nos prévisions n'a presque pas tourné plus vite dans le vide que dans l'air. Cette circonstance a montré une fois de plus la vérité du proverbe : « le mieux est l'ennemi du bien. » Il a fallu songer à revenir à l'appareil primitif composé de trois rouages et de trois miroirs séparés, appareil auquel je n'avais renoncé que pour conserver aux faisceaux réfléchis une forte intensité.

« La nécessité de recourir à ce premier moyen d'expérience s'est fait sentir au moment où ma vue affaiblie ne me permettait pas d'y prendre part. Mes prétentions doivent donc se borner à avoir posé le problème et avoir indiqué des moyens certains de le résoudre. Ces moyens peuvent, dans l'exécution, éprouver des modifications qui les rendront applicables, avec plus ou moins de facilité, sans changer leur caractère essentiel. »

§ 2. *Expériences de M. Foucault sur la vitesse de la lumière.*

175. M. Foucault est venu, le 6 mai 1850, nous communiquer à l'Académie des sciences un travail des plus remarquables sur la vitesse de la lumière (*Comptes rendus*, t. XXX, p. 551). Nous nous sommes tous empressés d'aller voir ses expériences ; c'est d'après ce que j'ai vu à cette époque avec mes confrères et d'après les éclaircissements particuliers que M. Foucault a bien voulu me donner que je vais exposer sa méthode et ses moyens d'observation ; il a eu de plus la bonté de surveiller lui-même les dessins que j'ai fait prendre de ses appareils, et l'exécution de la planche qui les représente. Pour rendre cette exposition plus claire, je la diviserai en quatre parties :

Propositions théoriques ;

Formules ;

Mécanisme ;

Disposition effective et résultats obtenus.

Tous les appareils sont représentés dans la planche 41.

Propositions théoriques.— 1° *On peut faire coïncider l'image d'un objet avec l'objet lui-même.* Un héliostat réfléchit dans la chambre noire un trait solaire horizontal; sur l'ouverture du volet on applique le diaphragme (FIG. 3), composé d'une plaque opaque portant une ouverture carrée de 2^{mm} de côté, au milieu de laquelle est fixé verticalement un fil de platine très-fin, c'est ce diaphragme qui sert d'objet; la figure 1 représente la coupe horizontale de tout le système, *a* et *b* sont les deux bords du diaphragme. Sur l'axe du faisceau on place une bonne lentille achromatique *l*, qui donne en *a'b'* une image réelle de l'objet, image qui peut être amplifiée à volonté, mais qui n'a ici qu'un grossissement égal à 2. Au lieu de la recevoir sur un tableau, on la reçoit sur un miroir sphérique concave *v* d'une courbure convenable et dont le centre est exactement sur l'axe du faisceau; alors cette image est renvoyée sur l'objet lui-même, sans grossissement ni renversement et vient coïncider avec lui en tous ses points. En effet, considérons le point *a*, par exemple, celui de ses rayons qui est sur le centre du miroir, entre *l* et *v*, se réfléchit normalement, rebrousse chemin et retourne au point *a*; le rayon *x* qui passe à côté du centre, se réfléchit en passant de l'autre côté avec un angle égal, faisant ainsi un échange de route avec son homologue *y*, et l'un et l'autre sont ramenés au point *a*, le premier par le chemin qu'a suivi le second pour arriver au miroir, et celui-ci par le chemin qu'a suivi le premier. Ce que nous venons de dire du faisceau émis par le point *a* s'applique au faisceau émis par le point *b*, et par tous les points du diaphragme et du fil de platine, qui forment l'objet. On peut d'ailleurs le vérifier par l'expérience, il suffit pour cela de disposer une glace sans tain *g*, à 45° sur le faisceau incident; les rayons de retour en se réfléchissant partiellement sur la première surface de la glace, viennent former en αβ l'image réelle dont il s'agit et l'on peut, ou la recevoir sur un écran, ou l'observer avec l'oculaire *o*. En donnant à la glace une épaisseur convenable on évite la confusion qui pourrait résulter des images réfléchies sur la première et sur la seconde surface.

Cette solution peut être modifiée de la manière suivante : un peu au delà de la lentille, sur le faisceau convergent on place un miroir plan *m*, dont le milieu est rencontré en *z* par l'axe optique; du point *z* comme centre, avec un rayon *zf* on décrit une circonférence et l'on vient appliquer en *v'* un miroir sphéri-

que ayant son centre au point z; en abaissant des points a', b', des perpendiculaires sur le prolongement μ du miroir m, on aura en a'', b'', l'image de a, b, qui allait se faire en a', b'. Tout ce que nous avons dit tout à l'heure du miroir v s'applique au miroir v', qui donnera donc en $\alpha\beta$ une image réelle de ab.

Voici maintenant la propriété remarquable de cette nouvelle solution, c'est que le lieu de l'image $\alpha\beta$ est indépendant de la position du miroir m; en effet, si l'on change son obliquité pour lui donner la position m', il suffit, sur son prolongement μ' d'abaisser des perpendiculaires des points a', b', pour avoir en $a'''b'''$, l'image de ab qui allait se faire en a',b'. En donnant par conséquent au miroir v' toute l'ouverture qu'il peut recevoir, on pourra à volonté déplacer le miroir m'; tant que les rayons réfléchis tomberont sur v', on aura une image $\alpha\beta$ toujours exactement la même et au même lieu.

Il importe de remarquer que l'espace angulaire que l'image parcourt sur le miroir v' est double du déplacement angulaire du miroir m; celui-ci est un angle au centre $\mu z \mu'$, l'autre est un angle inscrit $f'' f' f'''$.

2° *La rotation du miroir plan n'empêche pas en général la coïncidence qui a lieu par la proposition précédente; mais, elle l'empêche et produit une déviation* ε *quand la vitesse de rotation est assez grande.* Au lieu de déplacer seulement le miroir m, on lui donne un mouvement de rotation continu, dans le sens indiqué par la flèche; alors il est facile de se rendre compte des effets, du moins pour les rotations lentes : les rayons réfléchis seront successivement projetés sur tous les points de la circonférence vv', pour chaque demi-révolution du miroir m; tant qu'ils tomberont sur le miroir concave v', on verra l'image $\alpha\beta$, pendant le reste de la circonférence, on ne la verra pas; l'ouverture de v' étant, par exemple, de 6°, on la verra pendant $\frac{1}{60}$ de circonférence, et elle disparaîtra pendant $\frac{59}{60}$. Cependant quand la vitesse de rotation commence à atteindre 25 ou 30 tours par seconde, la persistance des impressions fait voir une image persistante; seulement elle a moins d'éclat que si le miroir m était en repos.

Quand la rotation devient très-rapide, plusieurs centaines de tours par seconde, les choses changent d'aspect et c'est par le phénomène qui se produit alors que M. Foucault est parvenu à résoudre la grande question de la vitesse de la lumière.

Ce phénomène est celui du déplacement ou de la déviation de l'image réfléchie, cette image au lieu d'être ramenée en coïncidence exacte avec l'objet *ab*, ou, ce qui revient au même, avec l'espace $\alpha\beta$ qu'elle occupait d'abord à l'égard du fil micrométrique de l'oculaire *o*, se trouve transportée latéralement, dans un sens déterminé et d'autant plus que la vitesse est plus grande. Ainsi, le point *a* (Fig. 2) qui fait d'abord son image en α, pour toutes les petites vitesses, va la faire en α', dans les grandes vitesses, comme si la lumière était partie, non plus du point *a* mais d'un autre point *d'*. Essayons d'en bien faire comprendrela cause.

Le point *a* fait son image en *a'* au moyen du miroir ν' (Fig. 2), le petit faisceau qui vient se concentrer en a'' pour la produire a été réfléchi quand le miroir plan passait par la position *m*; mais à cause de sa grande vitesse il se trouve bientôt en *m'*. D'un autre côté la lumière a dû mettre un certain temps, très-court il est vrai, mais enfin un certain temps fini θ, pour venir du miroir plan au miroir concave, de plus elle doit mettre le même temps pour retourner, par la réflexion, du miroir concave au miroir plan. Or, admettons que ce temps 2θ soit précisément celui que le miroir tournant a employé pour passer de *m* en *m'*, c'est donc dans cette position *m'* qu'il va opérer la réflexion de retour des rayons venus du point a'', et il ne pourra plus les renvoyer au point *a*, car il faudrait pour cela qu'il fût en *m*, ou qu'étant en *m'* les rayons partissent d'un autre point que a''. Pour trouver où il va renvoyer ces rayons, il suffit d'abaisser du point a'' une perpendiculaire sur le prolongement μ' du miroir et de la prolonger jusqu'à la circonférence décrite du point *z* comme centre, avec un rayon *za'* ou za'', ce point d'' est le lieu de l'image réelle d'un certain point *d'* qui viendrait précisément faire son image en a'' si le miroir tournant était arrêté en *m'*; donc en définitive l'image du point *a* va, pendant le mouvement, paraître en *d'* ou en α' dans le micromètre, éprouvant une déviation linéaire ε égale à *ad'* ou à $\alpha\alpha'$. Ainsi la vitesse de la lumière, la vitesse de rotation du miroir, et l'amplitude de la déviation, sont trois choses liées entre elles par une relation si étroite que deux de ces trois choses étant données, on en peut déduire la troisième.

Formules qui donnent la déviation ε au moyen de la vitesse v de la lumière et de la vitesse du miroir tournant. — Soit *r* le rayon za'' du miroir concave exprimé en mètres, le temps 2θ

que met la lumière pour aller de z en a'' et pour revenir de a'' en z est donné par

$$2\theta = \frac{2r}{v},$$

v étant la vitesse de la lumière exprimée aussi en mètres.

Désignons par n le nombre des tours que le miroir tournant fait en 1″ et par x l'angle qu'il décrit pendant le temps 2θ, cet angle étant exprimé en degrés, minutes et secondes de la circonférence dont le rayon est pris pour unité; puisque le miroir fait un nombre de degrés $2\pi n$ en 1″, pour faire x degrés il met un temps

$$\frac{x}{2\pi n} = 2\theta = \frac{2r}{v}, \quad \text{d'où} \quad x = \frac{4\pi n r}{v}.$$

L'angle $a'zd'' = \omega'$, étant double de x, on a

$$\omega' = \frac{8\pi n r}{v}.$$

Représentons par ω l'angle $ayd' = a'yd''$, par b le distance ay de l'objet à la lentille, par l la distance yz de la lentille au miroir tournant, on a alors $a'y = r + l$; et les angles étant assez petits pour que l'on puisse les prendre pour leurs tangentes, on aura

$$\varepsilon = b\omega, \quad \frac{\omega}{\omega'} = \frac{r}{r+l},$$

par conséquent

$$\varepsilon = \frac{8\pi r^2 b n}{v(r+l)},$$

puisque la lumière met 8′ 13″ pour venir du soleil à la terre ou pour parcourir 24 000 rayons terrestres, de 6 366 000 mètres, on a $v = 309\,906\,085$ mètres.

Supposons que l'on prenne les données suivantes pour l'expérience

$$b = 3^{\text{m}},$$
$$r = 4^{\text{m}},$$
$$l = 1^{\text{m}},1818;$$

on en tire, pour $n = 100$, $\varepsilon = 0^{\text{mm}},075$; pour $n = 800$, $\varepsilon = 0^{\text{mm}},6$. Ainsi quand le miroir fait seulement 100 tours par seconde la déviation est déjà facile à observer; car 7 centièmes de millimètre se distinguent aisément à l'œil nu, et deviennent une quantité considérable avec un grossissement de 15 ou 20 fois.

Digitized by Google

Voilà donc, pour la vitesse de la lumière, une solution théorique qui ne laisse rien à désirer, ni du côté de l'élégance et de la simplicité, ni du côté de la précision. Elle se réalise dans une chambre de 4 mètres de longueur.

Mécanisme qui imprime au miroir une vitesse de rotation constante facile à mesurer et à régler entre 20 ou 30 tours et plus de 1000 tours par seconde. — L'appareil de rotation est représenté (Fig. 5, 6, 7, 8, 9), c'est une *sirène à vapeur* dont l'axe d'acier *ab* porte le miroir *m*; le plateau *pp'* de la sirène est au-dessus de la boîte *cd*, vue plus en grand en coupe et en plan (Fig. 8, 9), la vapeur arrive par le tube *t* (Fig. 5), et se règle par un robinet. Elle sort de la boîte par les deux ouvertures *e*, *f*, vues en plan (Fig. 9) et en coupe (Fig. 8), pour entrer dans les orifices obliques du plateau de la sirène (Fig. 7, 8). Le miroir est vu en grandeur naturelle (Fig. 6), *m* est une vue de face, *m'* est une coupe verticale qui fait voir le tambour d'acier dans lequel le miroir est fixé et arrêté par les deux anneaux *n*, *n'*; le miroir se compose d'un disque, taillé de mesure dans une glace épaisse, ayant sa surface réfléchissante argentée avec soin, il agit comme un miroir étamé ordinaire. Tout ce mécanisme est ajusté par M. Froment avec une telle habileté que même dans les plus grandes vitesses, il n'y a aucune de ces flexions qui ôterait à l'appareil quelque chose de sa parfaite exactitude. Outre le son qui peut, jusqu'à un certain point, donner la mesure de la vitesse, il y a un compteur particulier, dont l'idée est des plus ingénieuses comme tout ce qui tient à cet ensemble si heureusement combiné.

Disposition effective de l'appareil et résultats obtenus. — M. Foucault, une fois en possession d'une méthode aussi sûre, a voulu résoudre d'abord la grande question, jusque-là insoluble d'une manière directe, la question de savoir, entre les deux systèmes de l'émission et des ondulations, quel est celui qui représente la vérité. Le système de l'émission conclut forcément que la lumière se propage dans l'eau plus vite que dans l'air; le système des ondulations, au contraire, conclut forcément que la lumière se propage dans l'eau moins vite que dans l'air. Comparons donc ces vitesses et reconnaissons enfin laquelle des deux est la plus grande.

L'expérience est représentée (Fig. 4), *a* est l'ouverture du volet, sur laquelle est appliqué le diaphragme (Fig. 3), l'ob-

Digitized by Google

jectif est en l, le miroir tournant en m; deux miroirs concaves de même rayon sont disposés l'un en ν, l'autre en ν'; sur le trajet du faisceau qui vient se réfléchir sur celui-ci, est un tube t de 2 mètres de longueur, plein d'eau et fermé aux deux bouts par des glaces minces et parallèles; les images réfléchies s'observent avec l'oculaire o qui est représenté en grandeur naturelle (Fig. 10). Le faisceau convergent qui traverse l'épaisseur de l'eau aurait son point de convergence porté au delà de ν', une lentille simple, de longueur focale convenable, est placée en l' pour corriger cet effet, et ramener le point de convergence exactement sur le miroir ν'. Cela posé, le miroir m étant en repos, on doit observer deux images réfléchies et parfaitement coïncidentes, l'une résultant de la réflexion sur ν, l'autre de la réflexion sur ν'; dans cet état elles ne pourraient aucunement se distinguer l'une de l'autre, bien qu'il y ait entre elles une différence de teinte; car, l'image de l'eau est plus faible d'intensité et colorée en vert; on s'en aperçoit en couvrant successivement l'un ou l'autre miroir; mais quand elles viennent ensemble il n'y a plus de distinction possible.

Il importe cependant de les observer toutes les deux à la fois et de les reconnaître. M. Foucault résout cette nouvelle difficulté de la manière suivante : l'image occupe sur le miroir un espace carré $a''b''$ (Fig. 1); pour en réduire la hauteur verticale, pour lui ôter, par exemple, un tiers en haut et un tiers en bas, il suffit de couvrir le miroir d'un écran qui ne laisse libre que la partie du miroir correspondant au tiers du milieu; c'est ce qui est représenté (Fig. 15), ce miroir ν est celui qui renvoie l'image de l'air, l'autre miroir ν' qui renvoie l'image de l'eau n'a pas d'écran, et son image conserve toute sa hauteur, qui est indiquée par les deux lignes parallèles rr, $r'r'$. Quand il n'y a pas d'écran, les deux images ensemble, vues avec l'oculaire, présentent l'apparence (Fig. 11); quand le miroir ν a son écran, son image seule présente l'apparence (Fig. 12); et, les deux ensemble l'apparence (Fig. 13), l'image de l'eau étant ici parfaitement visible et distincte dans son tiers d'en haut et d'en bas, tandis que son tiers du milieu est éclipsé par l'image de l'air avec laquelle il coïncide. Le fil fin de platine du diaphragme (Fig. 3) qui sert d'objet, est alors droit et continu, comme s'il était formé par une seule réflexion.

Maintenant mettons le miroir m en mouvement; quand la

vitesse sera seulement de 200 tours par seconde, nous verrons apparaître le phénomène décisif : la déviation commence, l'image du fil de platine se brise ; le tiers du milieu qui appartient à l'image de l'air se déplace, et il se déplace autrement que les deux autres tiers, le supérieur et l'inférieur qui appartiennent à l'image de l'eau. Ainsi la différence des vitesses de la lumière dans l'eau et dans l'air est rendue manifeste.

Mais quelle est la plus grande de ces deux vitesses? quel est celui des deux systèmes qui a raison? qu'est-ce que la lumière? est-elle une émission de la substance propre et impondérable des corps? est-elle un simple mouvement de vibration dans une substance éthérée, impondérable et infinie qui remplit l'espace?

Observons l'amplitude relative des deux déviations, elle seule peut répondre à ces questions, et elle y répond d'une manière décisive, comme le montre la figure 14 qui représente l'image que l'on aperçoit dans l'oculaire quand le miroir fait 500 ou 600 tours par seconde. L'image de l'eau est plus déviée que l'image de l'air; donc dans l'eau la lumière se propage avec moins de vitesse que dans l'air. Ainsi, au lieu d'être croissante avec la réfrangibilité, comme le voudrait le système de l'émission, la vitesse de la lumière est au contraire décroissante, comme le veut le système des ondulations.

Voici les données de l'expérience de M. Foucault :

Longueur focale de l'objectif..........	$1^m,90$
Rayon des miroirs concaves...........	$r = 4^m,00$
Distance de l'objectif au diaphragme....	$b = 3^m,00$
Distance de l'objectif au miroir........	$l = 1^m,1818$.

Pour 800 tours par seconde on en déduit, comme nous l'avons vu, $\varepsilon = 0^{mm},6$; pour l'image de l'air.

Le tube a seulement 2 mètres de longueur, l'indice de réfraction de l'eau est $\frac{4}{3}$.

Dans le système de l'émission il représente une longueur d'air de $\frac{6^m}{4}$, il faut y ajouter les 2 mètres d'air qui complètent la distance de 4 mètres égale au rayon du miroir, et doubler le résultat pour l'aller et le retour, ce qui donne l'équivalent de 8 mètres d'air.

Digitized by Google

Dans le système des ondulatious l'épaisseur d'eau de 2 mètres représente une longueur d'air de $\frac{8^m}{3}$, il faut y ajouter les 2 mètres d'air et doubler le résultat, ce qui donne l'équivalent de $9^m,34$.

Pour l'autre miroir v, la lumière, pour l'aller et le retour doit parcourir 8 mètres, et avec une vitesse de 800 tours la déviation ε est de $0^m,6$, ou de $0^{mm},075$, pour chaque mètre.

Ainsi, dans le système de l'émission, la déviation ε' de l'image de l'eau serait $\varepsilon' = 0^{mm},525$, donnant $\varepsilon - \varepsilon' = 0^{mm},075$.

Dans le système des ondulations la déviation ε'' de l'image de l'eau doit être $\varepsilon'' = 0^{mm},7$, donnant $\varepsilon'' - \varepsilon = 0^{mm},1$.

La différence des deux systèmes se traduit donc, non-seulement par une position inverse de l'image de l'eau par rapport à l'image de l'air, mais encore par une différence absolue de $0^{mm},115$, qui par un grossissement de 10 fois devient $0^{mm},75$. On peut juger par là combien l'expérience est tranchée et décisive.

On doit toutefois remarquer qu'elle tient particulièrement ce caractère de la parfaite égalité des rayons de courbure r et r' des deux miroirs v et v' ; car si ces rayons étaient différents, les déviations de l'image de l'air et de l'image de l'eau seraient entre elles comme $r^2(r'+l)$ est à $r'^2(r+l)$, ou, par exemple, comme 4 est à 5, si le rayon r' surpassait de $\frac{1}{5}$ le rayon r.

§ 3. *Expériences de M. Fizeau sur la vitesse de la lumière.*

176. *Expérience de Suresnes.* — M. Fizeau est le premier expérimentateur qui soit parvenu à rendre sensible la vitesse de la lumière à la surface de la terre ; il n'a pas seulement résolu cette grande question si longtemps insoluble, mais il a, en même temps, imaginé et fait construire des appareils qui ont pu donner la mesure de cette vitesse, entre deux points distants seulement de quelques kilomètres. La première communication qu'il a faite à l'Académie des sciences sur ce sujet est du 23 juillet 1849; par conséquent antérieure de dix mois à celle de M. Foucault dont nous venons de parler (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXIX, p. 90 et 132). Si je n'ai pas adopté l'ordre chronologique dans l'exposition que j'en fais ici, c'est seulement pour ne pas séparer les trois expériences de M. Fizeau, dont la dernière (septembre 1851) n'est pas moins remarquable que la première.

Indiquons d'abord les principes de l'expérience de Suresnes

(Pl. 42, Fig. 14). Deux objectifs x, y sont disposés sur le même axe, à une grande distance l'un de l'autre; acb est le foyer principal du premier, def le foyer principal du second; ici est un miroir concave d'un rayon égal à la distance focale principale de l'objectif y, dont l'axe coïncide avec l'axe commun des deux objectifs; g est une glace mince à faces parallèles, inclinée de 45° sur cet axe et réfléchissant sur l'appareil la lumière s d'une lampe. Ceux de ces rayons réfléchis qui se croisent au point c, forment, au sortir de l'objectif x, une colonne de rayons parallèles que l'objectif y reçoit et fait converger en e; là, réfléchis par le miroir concave, ils reviennent sur cet objectif, chacun prenant au retour la route que son homologue avait suivie pour l'arrivée, ils reproduisent au sortir de y une colonne de rayons parallèles qui est reçue par l'objectif x, et qui revient ainsi former en c, l'image réelle du pinceau primitif; alors cette image peut être observée avec un oculaire placé quelque part en h derrière la glace parallèle.

Ce que nous venons de dire des rayons de la lampe qui au départ, après leur réflexion sur la glace, viennent se croiser en c, sur l'axe même du système optique, s'applique évidemment aux points voisins de c, dans une certaine étendue qui dépend de la distance des objectifs x et y. Dans la figure 14 les points a et b sont pris presque à la limite, car les colonnes parallèles qu'ils donnent au sortir de x ne viennent couvrir qu'un très-petit segment de l'objectif y; mais ce segment serait encore suffisant pour produire en f une image de a, en d une image de b; et, par conséquent au retour des images réelles de ces points qui pourraient être observées avec l'oculaire h.

Cette explication théorique facilitera l'intelligence de l'appareil réel qui est représenté dans les figures 13, 15 et 16. L'objectif x est ici monté dans son corps de lunette, et cette lunette était établie à Suresnes à l'étage supérieur de la maison de M. Fizeau; l'objectif y est pareillement monté dans son corps de lunette, et cette lunette était établie à l'étage supérieur d'une maison de Montmartre à la distance de 8633 mètres. Ici, au foyer principal était ajusté avec beaucoup de soin un miroir m qui pouvait être plan à raison de la grande distance. M. Fizeau était parvenu à obtenir et à vérifier à volonté par des moyens ingénieux la coïncidence des axes des deux lunettes.

Les expériences étaient faites de nuit avec la lumière très-vive

d'une lampe placée en s, de plus cette lumière n'arrivait sur la glace g qu'après avoir été préparée par deux lentilles u, z, séparées par un diaphragme t, dont l'image très-étroite venait se faire précisément sur l'axe de l'objectif x et en son foyer principal. L'œil, placé à l'oculaire h, apercevait un point lumineux constant dont l'image était formée par la lumière que la glace g envoyait à Montmartre et que le miroir m de Montmartre renvoyait à l'oculaire h. Cette image toutefois était un peu vacillante le jour où je l'ai observée vers 10 heures du soir, à cause d'une certaine agitation qui régnait alors dans l'atmosphère.

La lumière, parcourant en 1″ environ 70 000 lieues ou 280 000 kilomètres, devait mettre un peu moins de $\frac{1''}{1500}$ pour parcourir ce double trajet.

Essayons de faire comprendre par quelle heureuse idée M. Fizeau est parvenu a mesurer le temps que mettait en effet la lumière pour parcourir ces 17 kilomètres.

Une roue dentée acb d'un grand diamètre, mobile autour de l'axe c, dont quelques dents, grossies par l'oculaire, se montrent sur la figure 16, est disposée pour se mouvoir avec une grande vitesse au moyen du système d'engrenage que représente la figure; les dents, qui laissent entre elles un vide égal au plein, aboutissent au foyer de l'objectif x; ainsi pendant la rotation de la roue, quand c'est une dent qui passe, la lumière venue de la lampe est arrêtée; mais quand c'est un vide qui passe, elle est libre comme si la roue n'y était pas, elle traverse, pour faire son aller et son retour de Suresnes à Montmartre et de Montmartre à Suresnes. Soit a le temps que met une dent à passer, a est aussi le temps que met à passer le vide qui sépare deux dents; soit t le temps que met la lumière pour aller de Suresnes à Montmartre tomber sur le miroir m et pour revenir, après sa réflexion, former une image au foyer de l'objectif x; si l'on a juste $a = t$, il n'y a pas d'image, l'œil placé à l'oculaire h ne peut rien apercevoir, les précautions sont prises pour que les dents elles-mêmes ne renvoient pas de lumière; au contraire, si la roue tourne moins vite, si l'on a $a > t$, l'œil peut toujours apercevoir l'image, cependant il ne la voit pas avec la moitié de son éclat, bien que la lumière passe pendant la moitié du temps, parce qu'il y en a toujours une portion plus ou moins grande

qui est interceptée au retour par les dents qu'elle peut rencontrer.

Il suffit donc d'augmenter progressivement la vitesse de la roue jusqu'à ce que l'on arrive à l'éclipse totale; alors, la durée du passage d'une dent est égale au temps que met la lumière pour faire son double trajet. Si la roue porte, par exemple, 500 dents et 500 vides, à 1 tour en 1″ le passage d'une dent est $\frac{1''}{1000}$, et à 15 ou 16 tours par seconde le passage d'une dent est $\frac{1''}{15000}$ ou $\frac{1''}{16000}$; il n'est donc pas difficile d'arriver à l'éclipse, et d'avoir, par conséquent, la vitesse de la lumière. Le mécanisme porte un compteur qui donne le nombre des tours de la roue lorsqu'on a réglé l'uniformité de son mouvement.

L'appareil jouit de plus d'une propriété curieuse qui donne une facile vérification des résultats. Supposons qu'après avoir trouvé la vitesse de la roue qui donne l'éclipse, on double la vitesse de manière que $2a = t$; alors on trouve l'image avec tout son éclat; car la lumière qui s'est glissée par un vide, retrouve précisément le vide suivant pour passer à son retour et venir frapper l'œil; de même à $3a = t$ on aurait une deuxième éclipse; à $4a = t$ une troisième apparition, etc.

La commission de l'Académie des sciences composée de MM. Biot, Arago, Pouillet, Regnault, a été autorisée par l'Académie à faire construire un grand appareil pour répéter ces belles expériences.

176 *bis*. **Expériences de MM. Fizeau et Breguet, pour déterminer la vitesse relative de la lumière dans l'air et dans l'eau.** — L'Académie des sciences, dans sa séance du 6 mai 1850, a reçu en même temps deux importantes communications sur le même sujet; celle de M. Foucault que nous avons développée dans le paragraphe précédent, et celle de M. Fizeau (*Comptes rendus*, t. XXX, page 562), que nous allons pareillement développer ici. Dans cette première note, M. Fizeau fait connaître sa méthode et la disposition de ses appareils; après avoir résolu la question de la vitesse absolue de la lumière par l'expérience de Suresnes, dont il avait combiné tous les éléments, il rentre ici dans le programme de M. Arago et dans le principe du miroir tournant; il explique comment il est parvenu à lier ce principe à l'idée fondamentale qui lui avait si bien réussi un

an auparavant, c'est-à-dire à l'idée de ramener les rayons à leur point de départ au moyen de la triple combinaison des objectifs, des miroirs courbes et de la glace parallèle. M. Foucault s'était placé de son côté sur ce terrain mixte, et ses appareils avaient fonctionné un peu plus tôt; M. Fizeau vint présenter les résultats de ses expériences le 17 juin (*Comptes rendus*, t. XXX, page 771).

Les appareils de M. Fizeau sont représentés (Pl. 42, Fig. 7, 8, 9, 10, 11, 12); ils étaient établis à l'Observatoire, dans la salle de la Méridienne.

Les figures 9 et 10 sont les figures théoriques.

Dans la figure 9, a est l'objet, b l'objectif, m le miroir tournant; s'il n'y était pas, a ferait son image en a'; mais du centre z de ce miroir on a décrit la circonférence $a'\,a'''\,a''$, sur laquelle se trouvent les deux miroirs concaves v, v' dont le centre est aussi en z. Alors, le miroir tournant étant dans la position m, l'image de a vient se faire en a'' sur le miroir concave v, les rayons qui la forment, réfléchis par v, viennent rapporter cette image a sur l'objet lui-même. Si le miroir tournant est dans la position m' l'image de a vient se faire en a'' sur le miroir concave v', qui la renvoie de même à son origine sur l'objet a.

Ainsi, qu'il y ait un ou plusieurs miroirs concaves remplissant les conditions que nous venons d'indiquer, pendant la rotation du miroir tournant, si l'on ne tient pas compte de la vitesse de la lumière, on doit voir sur l'objet a lui-même, son image de retour parfaitement égale et coïncidente. Cette image de retour serait, il est vrai, intermittente et ne paraîtrait que pour des positions déterminées du miroir tournant; mais aussitôt que la vitesse de rotation serait assez grande, la persistance des impressions lui donnerait l'apparence d'une image fixe et permanente.

Il en est autrement lorsqu'on tient compte de la vitesse de la lumière; alors, pour une vitesse assez grande du miroir tournant, l'image de retour se déplace à l'égard de l'objet; et la mesure de ce déplacement donne la mesure de la vitesse de la lumière elle-même, lorsqu'on connaît celle du miroir tournant.

En effet, soit x (Fig. 10) l'angle que décrit le miroir m pendant le temps que met la lumière à passer de z en a'' et à re-

venir de a'' en z ; abaissons la perpendiculaire $a''d''$ sur cette nouvelle position m' du miroir, par le centre c de l'objectif menons la ligne $d''cd'$, l'image de retour du point se fera voir en d' ; et comme l'angle $a'a''d''$ est égal à x, l'arc $a'd''$ est égal à $2x$; par conséquent la déviation ε est donné par la relation

$$\varepsilon = 2x \cdot \frac{a'z}{a'c}.$$

Cela posé, voici la description des appareils de M. Fizeau.

Le miroir tournant m (Fig. 11 et 12) est mis en mouvement par un mécanisme, imaginé et construit avec une rare perfection par M. Breguet ; nous ne pouvons pas entrer ici dans la description détaillée de cette ingénieuse machine, nous l'avons seulement représentée en plan (Fig. 11), en profil et élévation (Fig. 12) afin de montrer l'ajustement et la disposition des principaux rouages ; un homme en mettant la main à la manivelle v, peut imprimer au miroir m une vitesse qui s'élève jusqu'à 2000 tours en une seconde, et soutenir cette vitesse pendant un certain temps avec une régularité suffisante. Les expériences ont été faites avec des vitesses de 500 à 600 tours ; cependant la vitesse a été portée dans quelques cas jusqu'à 1500 tours. Cette machine pouvait aussi recevoir le mouvement par une puissance mécanique.

Ce mécanisme est solidement fixé de telle sorte que l'axe de rotation du miroir m (Fig. 12) soit vertical, et que le centre du miroir se trouve en z (Fig. 8) ; une lunette horizontale dont l'objectif est en x, porte à son foyer un très-petit prisme rectangulaire p, dont l'hypoténuse fait 45° avec l'axe de la lunette ; c'est l'arête de ce prisme qui sert de mire, on l'observe avec l'oculaire o. La lumière solaire s, concentrée par une lentille l, arrive sur l'une des faces du prisme, éprouve la réflexion totale sur l'hypoténuse, est renvoyée sur l'objectif x et de là sur le miroir tournant dont le centre est en z, pour être réfléchie par lui d'une part vers le réflecteur r, de l'autre vers le réflecteur r'. Ces réflecteurs sont ici des lentilles plans convexes, dont la surface plane est étamée ; ils sont plus faciles à construire avec précision et jouissent de toutes les propriétés des miroirs concaves ; le premier r est à la distance convenable pour que la lumière en traversant l'air fasse son image de retour en p ; le

deuxième r' est précédé d'une colonne d'eau de deux mètres, contenue dans un tube de cristal t, fermé par deux glaces parallèles ; sa distance est plus grande, et cependant, à cause de l'interposition de l'eau, son image de retour est encore en n, comme la précédente. Ainsi, pendant le repos, soit que l'on dirige le miroir tournant pour avoir l'image de retour du réflecteur r, soit qu'on le dirige pour avoir celle du réflecteur r', on ne distingue ni l'une ni l'autre de ces images, à cause de leur parfaite coïncidence avec l'objet lui-même, ou plutôt avec l'arête du prisme p, qui sert de mire ; le champ de vision, lorsqu'on regarde par l'oculaire o, est exactement le même que s'il n'y avait ni miroir tournant ni réflecteur ; c'est simplement le prisme lui-même n (Fig. 7) avec son arête parfaitement nette. Si l'on donne au miroir m une vitesse de 500 ou 600 tours par seconde, en couvrant le réflecteur r' pour n'observer que l'image de retour du réflecteur r, on voit qu'elle se déplace dans la direction voulue ; le champ de vision est représenté en n' (Fig. 7). Si l'on couvre le réflecteur r pour n'observer que l'image de retour r', on observe un phénomène analogue, mais avec un déplacement différent. Enfin si l'on observe simultanément les deux images de retour des réflecteurs r et r', le champ de vision montre les deux déplacements inégaux n'' (Fig. 7), savoir le petit déplacement de l'image de retour de r et le déplacement presque double de l'image de retour du réflecteur r' ; celle-ci a un caractère bien reconnaissable, elle est d'un bleu verdâtre, accusant la coloration sensible des 4 mètres d'eau qui ont été traversés par les rayons qui la composent.

Le réflecteur r'' (Fig. 8) est disposé pour faire une expérience comparative de l'air et de l'eau en disposant les choses pour que la déviation doive être la même dans le système des ondulations ; mais à cause de l'interposition nécessaire de la lentille divergente l', M. Fizeau regarde cette expérience comme moins décisive. Je ne me rends pas compte de cette différence ; cette compensation des distances n'introduit pas ici d'autres éléments que ceux qui existent entre r et r'. Je regrette au reste de n'avoir pas eu l'occasion d'examiner et par l'expérience et par le calcul l'influence de ces compensations qui peut avoir une influence considérable sur les résultats, comme je l'ai indiqué en parlant des expériences de M. Foucault.

177. Expérience de M. Fizeau sur les modifications qu'é-

prouve la vitesse de la lumière suivant qu'elle se propage dans le sens du mouvement de l'eau ou en sens contraire. — La vitesse de la lumière est toujours si grande par rapport à la vitesse que nous pouvons imprimer aux corps pondérables qu'il y avait peu d'espoir de parvenir artificiellement à modifier la première par la seconde. On avait fait sur ce point diverses conjectures et bon nombre d'expériences qui n'avaient donné aucun résultat décisif; on était donc en général disposé à admettre que, dans les corps animés de la plus grande vitesse, la lumière se propage seulement de la même manière que s'ils étaient en repos. Cette question cependant a un très-haut degré d'intérêt, parce qu'elle est la seule peut-être dont la solution puisse nous apprendre quelque chose sur les caractères essentiels des forces qui unissent l'éther à la matière pondérable. M. Fizeau ne s'est pas laissé décourager par les tentatives antérieures, et les belles expériences qu'il a faites sur ce sujet donnent enfin à la théorie mathématique un élément nouveau, dont sans doute elle s'empressera de développer les conséquences.

Je dois me borner ici à faire connaître sa méthode expérimentale en indiquant rapidement les résultats auxquels il est parvenu (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXIII, p. 351, séance du 29 septembre 1851).

La disposition de l'appareil est représentée (Pl. 12, Fig. 1, 2, 3, 4, 5, 6). La figure 1 est une vue perspective de l'ensemble; la figure 2 est un plan, réduit aux seuls éléments nécessaires pour faire bien comprendre la marche des rayons lumineux; elle est repérée sur la première, et en jetant les yeux sur l'une et sur l'autre, il sera facile de prendre une juste idée du mouvement de la lumière et des modifications qu'elle éprouve.

On distingue d'abord trois pièces essentielles, savoir : deux lunettes conjuguées, comme dans l'expérience de Surésnes, ayant leurs objectifs, la première en x, la seconde en y, avec cette différence que ces deux objectifs sont seulement à 2 mètres et demi ou 3 mètres de distance; la troisième pièce est un système de deux tubes de verre, bien droits, de 5 à 6 millimètres de diamètre intérieur et d'environ 1 mètre et demi de longueur. Ces deux tubes parallèles et solidaires sont fermés à chaque extrémité par une glace commune, mastiquée avec soin pour éviter tous les effets prismatiques; puis ils portent à chaque bout deux

Digitized by Google

orifices latéraux : l'un inférieur, qui reçoit le tube de circulation d'eau; l'autre supérieur, qui reçoit un tube courbe terminé par une boule où vont se loger toutes les bulles d'air. Les axes de ces tubes sont à 9 millimètres l'un de l'autre; on les ajuste en conséquence à $4^{mm},5$ de l'axe commun des deux objectifs, afin qu'ils soient traversés par le faisceau lumineux central.

La rapide circulation de l'eau se fait de la manière suivante : quatre flacons tubulés 1, 2, 3, 4 (Fig. 1), qui contiennent le liquide, ont entre eux des communications diverses pour l'air qui donne la pression et pour l'eau qui la reçoit. Pour l'air, ils communiquent en croix, savoir : 1 et 3, au moyen de l'embranchement *i* et de ses deux tubes *u*; 2 et 4, au moyen de l'embranchement *i'* et de ses deux tubes *v*. Pour l'eau ils communiquent parallèlement, savoir : 1 et 2 par le tube d'observation *t*; 3 et 4 par le tube d'observation *t'*. De plus, *i* communique au réservoir à air comprimé *w* au moyen du tuyau de plomb *k* et du robinet *p*, tandis que *i'* communique avec le même réservoir *w* au moyen du tuyau de plomb *q* et du robinet *r*. Enfin les robinets *p* et *r*, représentés en coupe (Fig. 6) en *p'*, *r'*, sont des robinets à *deux eaux*; dans la position représentée (Fig. 6), *p* envoie le gaz comprimé à l'embranchement *i* et par suite aux flacons 1 et 3, tandis que *r* intercepte la pression et communique avec l'air atmosphérique, ce qui met l'embranchement *i'* et par conséquent les flacons 2 et 4 sous la pression ordinaire de l'atmosphère; mais, que chacun de ces robinets soit tourné de 90°, alors on obtient l'effet inverse, l'air des flacons 1 et 3 retombe sous la pression atmosphérique, et celui des flacons 2 et 4 reçoit la pression du réservoir *w*.

Par ce mouvement alternatif des robinets, le même liquide passe en sens contraire dans chacun des deux tubes d'observation; sur quoi il importe de remarquer encore que son mouvement est toujours croisé ou différent dans les deux tubes : si dans le tube *t*, par exemple, il va de l'objectif *y* vers l'objectif *x*, dans le tube *t'* il va, au contraire, de *x* vers *y*, et réciproquement.

M. Fizeau a pu produire ainsi des pressions de plus de deux atmosphères effectives, et imprimer à l'eau des vitesses d'environ 7 mètres par seconde.

Revenons maintenant à la figure 2 pour indiquer la marche des rayons lumineux. La lumière solaire *s*, concentrée par une

première lentille l, arrive sur un diaphragme a qui porte une fente étroite ; elle rencontre ensuite une lentille cylindrique b et donne, en son foyer c, une image linéaire et très-vive de la fente du diaphragme : c'est là, à proprement parler, la source de lumière, non pas le point lumineux, mais la ligne lumineuse. Une double glace parallèle g, représentée plus en grand en g', est inclinée de 45° sur l'axe commun des deux lunettes, et placée en avant du foyer principal d de l'objectif x, de manière que son centre soit à peu près à égale distance des points c et d. La lumière incidente, réfléchie par cette glace, est donc comme si elle partait du point d; par conséquent, au sortir de l'objectif x, elle donne un faisceau parallèle dont la partie efficace doit se propager par l'intérieur des tubes t et t'. Un diaphragme e percé de deux fentes verticales et parallèles qui correspondent à l'axe des tubes, arrête le faisceau et ne laisse passer que deux pinceaux étroits destinés à former des franges d'interférence. Ces pinceaux traversent donc le liquide des tubes, soit pendant le repos, soit pendant le mouvement, arrivent par l'objectif y qui est lui-même diaphragmé, et vont coïncider sur le miroir m qui occupe son foyer; là, sauf les effets de diffraction, ils donneraient une image de la ligne lumineuse c, qui est en même temps l'objet et la source de lumière. Par l'effet du réflecteur m, ces pinceaux font un échange de route : le premier repasse exactement par le chemin qu'avait suivi le second, et *vice versa*; ils sont ainsi ramenés à la glace g, ils la traversent en partie et peuvent être observés en d par l'oculaire o. Cette observation pourrait se faire naturellement dans l'air; mais pour voir le phénomène avec netteté, et pour en avoir la mesure, il est nécessaire d'adapter en d un micromètre divisé sur verre, représenté à part (FIG. 5) en μ, μ'; ici les divisions en sont grossies par l'oculaire, et il faut faire attention que les traits du micromètre ont, dans l'appareil, une direction verticale ainsi que les franges dont ils doivent mesurer le déplacement.

La distance de 9 millimètres, qui existe entre les deux fentes du diaphragme e, ne donnerait que des franges d'une extrême finesse. M. Fizeau remédie à ce grave inconvénient en ajustant sur la route des rayons, entre le diaphragme e et l'objectif x, ou une seule glace parallèle et inclinée h (FIG. 4), ou deux glaces pareilles (FIG. 3); comme elles déplacent les rayons parallèlement, elles produisent le même effet que si l'on avait pu

rapprocher à volonté les axes des tubes, et, par suite, les fentes du diaphragme *e*. Par cet artifice on obtient, en effet, sur le micromètre, des franges d'une largeur convenable pour faire les observations avec précision.

A la rigueur, on devrait avoir trois systèmes de franges, à cause des trois surfaces réfléchissantes de la double glace *g* (Fig. 2); mais les deux systèmes produits par la réflexion à la première et à la dernière surface, sont rejetés hors du champ de vision, et l'on n'observe que le troisième système plus intense, qui résulte de la réflexion sur les deux surfaces très-rapprochées du contact.

Voici maintenant les phénomènes qui se manifestent :

1° Les bandes qui traversent le champ de l'oculaire *z* (Fig. 5) sont les franges sombres qui se dessinent sur les traits du micromètre lorsque l'eau est en repos; elles restent fixes quand on interpose perpendiculairement une glace sur le trajet de l'un des pinceaux, ou même quand l'un des tubes d'observation est plein d'air, tandis que l'autre est plein d'eau : cette fixité tient à ce que, pendant le repos, les deux pinceaux sont toujours modifiés, l'un et l'autre, de la même manière, puisque chacun fait le double trajet en suivant, pour aller, le chemin qui ramène l'autre à son retour.

2° L'eau étant mise en circulation, les franges se déplacent, soit vers la droite de l'observateur, quand l'eau circule dans un sens, soit vers la gauche, quand l'eau circule en sens contraire; *s'* (Fig. 5) représente l'amplitude du mouvement vers la gauche; il est d'environ $\frac{1}{4}$ de la largeur d'une frange : mais en faisant circuler l'eau en sens contraire, on observe vers la droite un déplacement égal, ce qui donne, en somme, un déplacement d'une demi-largeur de frange, ou plus exactement 0,46, suivant que l'eau marche, dans un sens ou dans l'autre, avec une vitesse de $7^{m},07$ par seconde.

Quand l'eau marche dans un sens, par exemple, du flacon 1 au flacon 2, dans le tube *t*, par conséquent du flacon 3 au flacon 4, dans le tube *t'*, le pinceau qui est à gauche de l'observateur va toujours contre le courant, à son aller comme à son retour, tandis que le pinceau de droite est favorisé par le courant pour aller et pour revenir; celui-ci prend donc l'avance, et la déviation se fait vers la droite de l'observateur. Au contraire, en donnant au robinet *p* et *r* un quart de révolution, c'est le pinceau de

droite qui va contre le courant, et qui est retardé; celui de gauche qui va comme lui et qui prend l'avance : les franges sont donc rejetées vers la gauche de l'observateur. Ce déplacement des franges s'accomplit avec une parfaite régularité, et les divisions du micromètre en donnent la mesure d'une manière très-approchée.

Ainsi se trouve constatée pour la première fois, par une expérience décisive, l'influence du mouvement de la matière pondérable sur la vitesse de la lumière.

Cette méthode expérimentale est des plus ingénieuses; on ne peut pas douter, qu'avec quelques perfectionnements dans l'appareil, elle ne conduise à des mesures très-précises, non-seulement pour l'eau, mais aussi pour d'autres liquides plus ou moins réfringents, plus ou moins dispersifs; il est très-important de les comparer sous ce rapport. M. Fizeau propose lui-même d'employer des flacons d'une plus grande capacité, afin de pouvoir prolonger la circulation à pression constante assez longtemps pour avoir la mesure du déplacement avec plus d'exactitude.

L'air, animé d'une grande vitesse, n'a donné à M. Fizeau aucune déviation sensible.

On n'avait pu jusqu'à présent tenter que des hypothèses purement théoriques sur la nature des forces qui unissent l'éther à la matière pondérable; on avait fait l'hypothèse, infiniment peu probable, à mon avis, que les corps, dans leurs mouvements lents ou rapides, n'emportent rien de l'éther qui enveloppe leurs molécules; que la matière seule participe au mouvement de translation. On avait fait une seconde hypothèse qui consiste à regarder l'éther comme intimement uni à la matière, comme participant à tous ses mouvements. Fresnel, dont le nom seul fait autorité, n'avait admis ni l'une ni l'autre de ces deux hypothèses; il en avait proposé une troisième, à laquelle il avait été conduit par cette observation fondamentale de M. Arago, que le mouvement de la terre est sans influence sur la réfraction que le prisme fait subir à la lumière d'une étoile. Pour satisfaire à cette donnée, Fresnel regardait comme nécessaire qu'une portion seule de l'éther fût entraînée par le mouvement de la matière, l'autre portion plus ou moins considérable restant libre et ne se déplaçant pas avec elle.

M. Fizeau tire de ses résultats une confirmation de l'idée de

Fresnel; un calcul, dans le détail duquel je ne puis pas entrer ici, le conduit à cette conclusion, que le déplacement des franges qu'il a observé, aurait dû être double, si la totalité de l'éther de l'eau avait été mis en circulation avec elle dans les deux tubes d'observation.

SECONDE PARTIE.

LUMIÈRE POLARISÉE.

CHAPITRE PREMIER.

Double réfraction.

178. Phénomène général de la double réfraction. — On dit que la lumière éprouve la double réfraction dans une substance, lorsqu'en y pénétrant, un *seul faisceau* de lumière incidente naturelle donne naissance à *deux faisceaux réfractés*. Les substances qui exercent ce genre d'action sur la lumière sont appelées *doublement réfringentes* ; tel est, par exemple, le carbonate de chaux cristallisé ou *spath d'Islande*, qui se présente souvent sous la forme d'un rhomboïde allongé (Pl. 43, Fig. 1). En effet, lorsqu'en tenant ce rhomboïde au-devant de l'œil, on regarde contre le jour une épingle ou un objet délié , on en voit deux images distinctes, plus ou moins séparées l'une de l'autre , et, si l'on fait tourner le rhomboïde dans son plan pour qu'il accomplisse une révolution complète, les deux images tournent pareillement d'une circonférence entière. On observe les mêmes effets en posant le rhomboïde sur une feuille de papier blanc où l'on a tracé des divisions; en donnant même à ces divisions la forme d'un triangle (Fig. 2), comme l'avait fait Malus , on en a tiré un moyen assez simple pour mesurer l'écart des rayons; car, si l'on note sur la surface supérieure du cristal (Fig. 3), le point *i* d'émergence du rayon qui apporte à l'œil *o* la double image du point *a* de l'échelle divisée, il est évident qu'un rayon parti de l'œil et dirigé suivant *oi* donnerait, en entrant dans le cristal, deux rayons : l'un allant au point *a* de la première image; l'autre, au point *a'* homologue de la seconde image. Connaissant alors la distance *aa'* de l'échelle (Fig. 2) et sa position sur la seconde face du cristal (Fig. 3), on en peut déduire l'angle *aia'*. En faisant ces observations

avec un cercle divisé vertical, muni d'une lunette, on peut déterminer encore l'angle d'incidence ou d'émergence, *din*, et arriver ainsi à une grande exactitude.

La lumière solaire se divise dans ce rhomboïde comme la lumière des nuées; car on obtient deux images du soleil dans la chambre noire, en mettant le rhomboïde à l'ouverture du volet, et en dirigeant sur lui le faisceau réfléchi par le miroir de l'héliostat.

Tous les cristaux, dont la forme primitive n'est ni un cube ni un octaèdre régulier, sont biréfringents comme le spath d'Islande, ou du moins d'une manière analogue; mais leur ensemble se divise en deux classes parfaitement distinctes, celle des cristaux à *un axe* et celle des cristaux à *deux axes*. Voici le motif de cette division :

Dans un cristal doué de la *double* réfraction, il y a toujours *une* ou *deux directions* suivant lesquelles un rayon de lumière *ne se divise jamais*. Ces directions remarquables sont ce que l'on nomme les *axes optiques* du cristal, ou simplement *les axes*; elles ont toujours une certaine symétrie par rapport aux faces naturelles de la forme cristalline.

Les cristaux dans l'intérieur desquels il n'y a qu'*une* direction d'*indivisibilité* se nomment *cristaux à un axe*.

Les cristaux dans l'intérieur desquels il y a *deux directions d'indivisibilité* se nomment *cristaux à deux axes*.

Il ne paraît pas qu'il puisse exister des cristaux réguliers ayant plus de *deux axes*.

Nous allons étudier successivement les cristaux à *un axe* et les cristaux à *deux axes*.

179. Des cristaux à un axe et de leur section principale. — Nous prendrons encore pour exemple la chaux carbonatée, qui est un cristal à un axe; la *forme primitive* de cette substance est un rhomboïde représenté (FIG. 4) : c'est-à-dire qu'un cristal de chaux carbonatée peut toujours, quelle que soit sa forme, être regardé comme composé d'une infinité de molécules possédant toutes cette forme rhomboïdale, et disposées parallèlement l'une à côté de l'autre. Les dimensions absolues de ces molécules ne sont pas déterminées, l'on sait seulement qu'elles sont excessivement petites. La ligne *ax*, qui joint les sommets obtus de l'un de ces rhomboïdes, est ce que l'on appelle son *axe cristallographique*. Ainsi, dans un cristal quel-

conque, il y a une infinité d'axes, parce qu'il y a une infinité de molécules ; mais tous ces axes sont parallèles, puisque les molécules sont arrangées parallèlement, à moins que les cristaux ne soient *maclés*. Pour connaître l'axe d'un cristal donné, il suffit donc toujours de déterminer la position de l'une des molécules primitives constituantes. Or, l'expérience a démontré cette loi générale qui paraît sans exception, savoir, que, dans les *cristaux à un axe*, l'axe de double réfraction ou l'*axe optique* coïncide toujours avec l'axe cristallographique.

Pour vérifier ce résultat sur la chaux carbonatée, on peut tailler une plaque dont les deux faces soient perpendiculaires à l'axe cristallographique *ax* (Fig. 1 et 4), et l'on reconnaît en effet que jamais le faisceau ne se divise quand il traverse la plaque perpendiculairement à ses faces, c'est-à-dire quand il traverse le cristal en suivant son axe cristallographique ; mais, si le rayon se présente obliquement, il ne pénètre plus en suivant l'axe, et alors il se divise et fait voir deux images.

On peut encore tailler un prisme de chaux carbonatée, de telle sorte que l'axe cristallographique *ax* (Fig. 5) soit contenu dans la section *bde* du prisme, et fasse, avec son côté *db*, un angle assez petit pour qu'un certain rayon incident *is* puisse pénétrer dans la direction de l'axe : alors ce rayon ne se divisera pas, et, si le prisme est achromatisé avec un autre prisme de verre *dep*, le rayon émergent sera simple et sans couleur comme le rayon incident. Mais, d'autres rayons plus ou moins inclinés que *is*, ne devant plus pénétrer dans la direction *ix* de l'axe, éprouveront toujours une division intérieure, et feront voir deux images plus ou moins séparées. Ainsi, quelle que soit l'obliquité du rayon incident, soit qu'il entre par une face naturelle ou par une face artificielle, il n'éprouve jamais la double réfraction lorsqu'il traverse le cristal en suivant son axe.

Cette vérification peut se faire de la même manière sur tous les autres cristaux à un axe.

Quand un rayon de lumière ne se meut pas en suivant l'axe du cristal, des deux rayons qu'il donne il y en a toujours un qui reste soumis aux deux lois générales de la réfraction ; mais l'autre fait exception à ces lois, c'est-à-dire, qu'en général son plan de réfraction ne coïncide pas avec le plan d'incidence, et que les sinus d'incidence et de réfraction cessent d'être dans un

rapport constant. Le premier est appelé *rayon ordinaire*, et le second *rayon extraordinaire*.

La marche du rayon ordinaire ne présentant aucune difficulté, nous n'avons à nous occuper que de la marche du rayon extraordinaire, et nous indiquerons d'abord deux coupes du cristal dans lesquelles sa direction est très-remarquable. Ces coupes sont la *section principale* et la *section perpendiculaire à l'axe*.

1° *Section principale.* — Dans les cristaux à un axe, la *section principale* est le plan mené par l'axe perpendiculairement à une face quelconque, naturelle ou artificielle; ainsi la section principale appartient plutôt à une face qu'au cristal entier, car chaque face a la sienne. Or, on trouve par expérience que le rayon extraordinaire reste dans le plan d'incidence, comme le rayon ordinaire, toutes les fois que le plan d'incidence coïncide avec le prolongement de la section principale : dans ce cas particulier, le rayon extraordinaire reste donc soumis à la première loi générale de la réfraction, et il ne fait exception qu'à la seconde. Pour vérifier ce résultat, il suffit de faire tourner dans son plan un cristal à faces parallèles et de suivre le mouvement de l'image extraordinaire : on verra que dans le cercle qu'elle décrit autour de l'image ordinaire elle passe deux fois dans le plan d'incidence, et que ce phénomène arrive quand ce plan coïncide avec la section principale de la face d'entrée.

2° *Section perpendiculaire à l'axe.* — On appelle section perpendiculaire à l'axe tout plan conçu dans l'intérieur du cristal perpendiculaire à son axe. Or, quand un rayon naturel a une telle section pour plan d'incidence, le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire auxquels il donne naissance, ont aussi cette section pour plan de réfraction. Ainsi, dans ce cas, le rayon extraordinaire reste encore soumis à la première loi de réfraction; de plus, il est alors soumis à la seconde loi, c'est-à-dire que dans cette section, et dans celle-là seulement, ses sinus d'incidence et de réfraction conservent un rapport constant pour toutes les obliquités d'incidence. Ce rapport est l'*indice de réfraction extraordinaire*.

Dans le système de l'émission les cristaux avaient été appelés *répulsifs* ou *attractifs* suivant que l'indice ordinaire est plus grand ou plus petit que l'indice extraordinaire, parce qu'en effet dans ce système la réfraction étant produite par l'attraction que les corps exercent sur les molécules de la lumière, on peut

dire que les molécules lumineuses du rayon extraordinaire sont, dans le premier cas, moins attirées, et dans le second cas plus attirées que celles du rayon ordinaire. Mais dans le système des ondulations, la réfraction n'étant qu'un changement de vitesse qui résulte lui-même d'un changement d'élasticité ou de densité dans l'éther du second milieu, et la vitesse étant d'autant plus petite que l'indice de réfraction est plus grand, Fresnel (*Supplément à la Chimie de Thompson*, page 90), a été conduit à appeler cristaux *négatifs* ceux qu'on avait appelés répulsifs, et cristaux *positifs* ceux qu'on avait appelés attractifs, parce qu'en effet la différence des vitesses ordinaire et extraordinaire est *négative* dans les premiers et *positive* dans les derniers.

Les cristaux à un axe sont donc divisés en deux classes conformément au tableau suivant :

Table des cristaux à un axe.

NÉGATIFS.

Carbonate de chaux (spath d'Islande).	Béryl.
Carbonate de chaux et de magnésie.	Apatite.
Carbonate de chaux et de fer.	Idocrase (vésuvienne).
Tourmaline.	Vernerite.
Rubellite.	Mica (de Kariat).
Corindon.	Phosphate de plomb.
Saphir.	Phosphate de plomb arseniaté.
Rubis.	Hydrate de strontiane.
Émeraude.	Arseniate de potasse.
Hydrochlorate de chaux.	Octohédrite.
Hydrochlorate de strontiane.	Prussiate de potasse.
Sous-phosphate de potasse.	Phosphate de chaux.
Sulfate de nickel et de cuivre.	Arseniate de plomb.
Cinabre.	Arseniate de cuivre.
Mellite.	Néphéline.
Molybdate de plomb.	

POSITIFS.

Zircon.	Sulfate de potasse et de fer.
Quartz.	Suracétate de cuivre et de chaux.
Oxyde de fer.	Hydrate de magnésie.
Tungstate de zinc.	Glace.
Stannite.	Hyposulfate de chaux.
Boracite.	Dioptase.
Apophyllite.	Argent rouge.

180. Cristaux à deux axes. — Nous avons vu précédemment que le caractère des cristaux à deux axes est d'offrir deux directions, et pas plus de deux, suivant lesquelles le rayon naturel

Digitized by Google

incident peut pénétrer leur substance sans se diviser en deux autres rayons. Ces axes ne peuvent plus ici être définis d'une manière simple et commode par l'axe cristallographique; mais il est évident que les deux axes étant une fois connus pour un point d'une substance cristallisée, les deux lignes menées parallèlement à ces axes par un autre point quelconque seront les axes de cet autre point.

Fresnel a découvert par la théorie et démontré par l'expérience que dans les cristaux à deux axes il n'y a plus de rayon ordinaire, c'est-à-dire que les deux rayons qui naissent de la division d'un rayon incident ne suivent ni l'un ni l'autre les lois générales de la réfraction. La marche de la lumière est donc ici bien plus compliquée encore que dans les cristaux à un axe.

Cependant, nous allons indiquer deux coupes pour lesquelles la question se simplifie.

1° *Coupe perpendiculaire à la ligne moyenne.* — Supposons que px et px' (Fig. 6) représentent les deux axes d'un cristal : xpx' est l'angle de ces axes; et la ligne pm, qui divise cet angle en deux parties égales, est la *ligne moyenne*, ou la *ligne intermédiaire ;* le plan perpendiculaire à pm donne dans le cristal une section pour laquelle l'*un* des deux rayons se conforme aux lois générales de la réfraction.

2° *Coupe perpendiculaire à la ligne supplémentaire.* — Le plan perpendiculaire à la ligne ps, que l'on nomme ligne supplémentaire (parce qu'elle divise en deux parties égales le supplément de l'angle des axes) (Fig. 6), détermine dans le cristal une section pour laquelle l'*autre* des deux rayons qui naissent d'un rayon incident se conforme aux lois générales de la réfraction.

Au moyen de ces deux coupes, l'on pourra donc déterminer les indices de réfraction des deux rayons qui sont analogues au rayon ordinaire et au rayon extraordinaire des cristaux à un axe.

Voici le tableau des cristaux à deux axes.

Table des cristaux à deux axes.

Noms des substances.	Angles des axes.
Sulfate de nickel (certains échantillons).........	3° 0′
Sulfo-carbonate de plomb....................	» »
Carbonate de strontiane.....................	6 56
Carbonate de baryte........................	, »
Nitrate de potasse.........................	5 20
Mica (certains échantillons).................	6 »

Noms des substances.	Angle des axes.	
Talc	7°	24
Perle	11	28
Hydrate de baryte	13	18
Mica (certains échantillons)	14	»
Arragonite	18	18
Prussiate de potasse	19	24
Mica (certains échantillons)	25	»
Cymophane	27	51
Anhydrite	28	7
Borax	28	42
Mica (divers échantillons examinés par M. Biot)	30	»
	31	»
	32	»
	34	»
	37	»
Apophylite	35	8
Sulfate de magnésie	37	24
Sulfate de baryte	37	40
Spermaceti (environ)	37	42
Borax natif	38	48
Nitrate de zinc	40	»
Stilbite	41	42
Sulfate de nickel	42	4
Carbonate d'ammoniaque	43	24
Sulfate de zinc	44	28
Anhydrite (examinée par M. Biot)	44	41
Mica	45	»
Lépidolite	45	»
Benzoate d'ammoniaque	45	8
Sulfate de soude et de magnésie	46	49
Sulfate d'ammoniaque	49	42
Topaze du Brésil	49 à 50	»
Sucre	50	»
Sulfate de strontiane	50	»
Sulfo-hydrochlorate de magnésie et de fer	51	16
Sulfate de magnésie et d'ammoniaque	51	22
Phosphate de soude	55	20
Comptonite	56	6
Sulfate de chaux	60	»
Oxynitrate d'argent	62	16
Iolite	62	50
Feldspath	63	»

Noms des substances.	Angles des axes.
Topaze (Aberdeeshire)	65° »'
Sulfate de potasse	67 »
Carbonate de soude	70 1
Acétate de plomb	70 25
Acide citrique	70 29
Tartre de potasse	71 20
Acide tartrique	79 »
Tartrate de potasse et de soude	80 »
Carbonate de potasse	80 30
Cyanite	81 48
Chlorate de potasse	82 »
Épidote	84 19
Hydrochlorate de cuivre	84 30
Péridot	87 56
Acide succinique	90 »
Sulfate de fer	90 »

181. Lois générales de la double réfraction dans les cristaux à un axe et à deux axes. — Si, par un point donné dans l'intérieur d'un cristal, on conçoit des lignes tracées dans toutes les directions possibles, il est évident qu'un rayon de lumière peut traverser ce point en passant successivement par chacune de ces directions. Dans un cristal à un axe, le rayon ordinaire aura toujours la même vitesse, quelle que soit celle de ces routes suivant laquelle il se propage, tandis que le rayon extraordinaire aura une infinité de vitesses différentes comprises entre deux limites déterminées. Dans un cristal à deux axes, les vitesses seront changeantes avec les directions, soit pour l'un, soit pour l'autre des deux rayons que la double réfraction développe, et elles seront changeantes suivant des lois différentes. On doit à Huyghens une construction géométrique très-élégante, qui donne en même temps toutes les vitesses du rayon extraordinaire, et toutes ses positions par rapport au rayon ordinaire correspondant ; mais cette construction ne s'applique qu'aux cristaux à un axe. Les effets plus compliqués des cristaux à deux axes restaient inexactement exprimés, soit par la loi d'Huyghens, soit par les modifications plus ou moins ingénieuses que l'on avait essayé de lui donner, lorsque le génie de Fresnel parvint à saisir à la fois, comme dans une seule pensée, la cause de la polarisation, celle de la double réfraction et la loi générale de ces phénomènes dans tous les cristaux. Cette découverte

est, sans contredit, l'une des plus admirables découvertes dont la science se soit enrichie.

Pour ne pas anticiper sur ce qui appartient à la polarisation, nous nous contenterons de donner ici les vitesses des deux rayons qui naissent de la double réfraction; ces vitesses peuvent être exprimées en traduisant la construction de Fresnel, et alors elles prennent la forme suivante :

$$v^2 = d^2 + (d'^2 - d^2)\sin^2\tfrac{1}{2}(a' - a),$$
$$v'^2 = d^2 + (d'^2 - d^2)\sin^2\tfrac{1}{2}(a' + a):$$

v vitesse ordinaire, v' vitesse extraordinaire, a angle du rayon avec le premier axe, a' angle du rayon avec le deuxième axe, d pour les cristaux à un axe, vitesse ordinaire; pour les cristaux à deux axes, vitesse constante dans la section perpendiculaire à la ligne supplémentaire; d' pour les cristaux à un axe, vitesse extraordinaire; pour les cristaux à deux axes, vitesse constante dans la section perpendiculaire à la ligne moyenne.

Pour mieux faire comprendre ces formules, nous les discuterons dans quelques cas particuliers.

1° *Cristaux à un axe.* — Lorsque les deux axes se réduisent à un seul, les angles a et a' que le rayon fait avec chacun des axes se réduisent pareillement à un seul, et l'on a simplement :

$$v^2 = d^2$$
$$v'^2 = d^2 + (d'^2 - d^2)\sin^2 a.$$

Ainsi, la vitesse ordinaire v est constante dans toutes les directions et toujours égale à d : tandis que la vitesse extraordinaire v' dépend de l'angle a, que le rayon extraordinaire fait avec l'axe.

Quand ce rayon est dans la section perpendiculaire à l'axe, on a $a = 90°$, $\sin^2 a = 1$; et $v' = d'$.

Ainsi, la vitesse extraordinaire est constante.

Quand il se meut parallèlement à l'axe, on a $a = 0$, $\sin^2 a = 0$; et $v' = d$.

Ainsi, dans cette direction, et dans celle-là seule, la vitesse extraordinaire devient égale à la vitesse ordinaire.

Ces deux valeurs d' et d sont les deux limites de la vitesse extraordinaire : l'une est son maximum, et l'autre son minimum.

Dans le système ondulatoire que nous avons adopté, l'indice

de réfraction n'est autre chose que le rapport *direct* des vitesses, et, si nous représentons par 1 la vitesse de la lumière dans le vide, $\frac{1}{d'}$ sera l'indice de réfraction du rayon extraordinaire dans la section perpendiculaire à l'axe, tandis que $\frac{1}{d}$ sera l'indice de réfraction du rayon ordinaire; le caractère des cristaux négatifs sera donc $d'>d$, et celui des cristaux positifs $d'<d$.

Dans le premier cas, d'^2-d^2, coefficient de $\sin^2 a$, est positif, et le maximum de v' correspond au cas où l'on a $\sin^2 a=1$ ou $a=90^o$, tandis que le minimum correspond à $\sin^2 a=0$ ou à $a=0$. Dans le second cas, au contraire, d'^2-d^2 est négatif, et le minimum de v' correspond à $a=90$, et le maximum à $a=0$.

C'est donc toujours en se propageant suivant l'axe, et dans la section perpendiculaire à l'axe, que le rayon extraordinaire acquiert sa moindre et sa plus grande vitesse; mais pour les cristaux négatifs, le maximum a lieu dans la section perpendiculaire à l'axe, et le minimum dans le sens de l'axe, et c'est le contraire pour les cristaux positifs.

2° ***Cristaux à deux axes.*** — Quand le rayon est compris dans la section perpendiculaire à la ligne supplémentaire *ps* (Fig. 6), il est évident qu'il fait toujours des angles égaux avec chacun des axes *px* et *px'*; ainsi $a=a'$ et v^2 se réduit à

$$v^2=d^2 \text{ ou } v=d.$$

Ainsi, comme nous l'avons annoncé, d est dans ce cas l'expression de la vitesse, et c'est pour cette raison que nous appellerons *vitesses ordinaires* toutes celles qui sont données par les diverses valeurs de v.

Au contraire, quand le rayon se meut dans la section perpendiculaire à la ligne moyenne *pm*, la somme des angles a et a' est toujours égale à deux angles droits, d'où il résulte :

$$v'^2=d'^2 \text{ ou } v'=d'.$$

C'est pourquoi nous avons dit que d' représente la vitesse du rayon dans cette section, et nous appellerons aussi *vitesses extraordinaires* toutes celles qui sont données par la valeur de v'.

Quand d' est plus grand que d, le minimum de la vitesse or-

Digitized by Google

dinaire a lieu pour $a' = a$ ou pour $v = d$, et le maximum a lieu lorsque $a' - a$ est le plus grand possible, ce qui arrive dans le plan des axes.

Le minimum devient maximum, et *vice versa*, lorsque d est plus grand que d'.

Les maximum et minimum du rayon extraordinaire arrivent aussi pour $v' = d'$, et par conséquent pour le cas où le rayon est dans le plan des axes; mais ils changent pareillement de rôle lorsque d' est plus grand ou plus petit que d.

On peut encore remarquer que, dans tous les cas, la différence des carrés des vitesses est exprimée par la formule :

$$v'^2 - v^2 = (d'^2 - d^2) \sin a' \sin a,$$

c'est-à-dire que les deux rayons ordinaire et extraordinaire ayant une direction commune, les différences des carrés de leurs vitesses sont proportionnelles au produit des sinus des angles que chacun d'eux fait avec les deux axes. Cette remarque avait été faite par M. Brewster et par M. Biot avant que Fresnel eût indiqué la loi simple qui embrasse le phénomène dans toute son étendue.

182. **Diverses expériences de double réfraction.** — Nous indiquerons ici quelques-unes des nombreuses expériences que l'on peut faire pour habituer l'esprit à suivre les mouvements de la lumière dans les cristaux biréfringents.

1° **Expérience de Monge.** — En regardant la double image d'un objet b placé à quelque distance au-dessous de la surface inférieure d'un rhomboïde (Fig. 7), et en promenant une carte contre cette surface, on voit avec surprise que, si elle passe de gauche à droite, c'est l'image de droite qu'elle cache la première, et *vice versa*. Ce phénomène tient à ce que les faisceaux oo' et ee', qui apportent dans l'œil p l'impression des images ordinaire et extraordinaire, se *croisent* dans l'intérieur du cristal à cause de leur inégale réfrangibilité et de leur inégale incidence sur la surface d'entrée ff'. Le faisceau extraordinaire provenant de brr' n'arrive pas à l'œil, non plus que le faisceau ordinaire provenant de bxx'.

2° **Expériences sur le lieu apparent des images.** — En plaçant l'œil très-près de la surface supérieure d'un rhomboïde, et en regardant des points qui sont très-près de la surface inférieure, soit au dehors comme des marques faites sur du papier,

soit au dedans comme des taches particulières à la masse du cristal, on reconnaît que, des deux images d'un même point, l'une paraît sensiblement plus rapprochée que l'autre; et c'est l'image ordinaire, parce que, le spath d'Islande étant négatif, l'indice ordinaire surpasse l'indice extraordinaire.

3° **Appareils de M. Soleil pour distinguer les cristaux positifs des cristaux négatifs.** — Sur la moitié supérieure d'un prisme de verre ou de cristal, d'angle convenable, on colle un premier prisme de quartz, et sur la moitié inférieure on en colle un second de même angle; l'ensemble forme un parallélipipède, mais la lumière éprouve des modifications différentes, suivant qu'elle en traverse la moitié supérieure ou la moitié inférieure, car, dans la première, l'axe du quartz est disposé perpendiculairement à la face d'entrée de la lumière, et dans la seconde l'axe du quartz est, au contraire, parallèle aux faces du prisme, et par conséquent parallèle à la longueur du parallélipipède que nous supposerons vertical. Il en résulte qu'en regardant un objet délié et lui-même vertical, tenu à quelques décimètres de distance, et en plaçant l'œil à la hauteur de la section qui sépare les deux prismes de quartz, on observe les phénomènes suivants : l'*image*, vue par la partie supérieure du parallélipipède est simple, celle qui est vue par la partie inférieure est double; mais l'une d'elles est placée dans le prolongement de la première, c'est l'*image ordinaire;* l'autre est, par conséquent, l'*image extraordinaire*. Or, par la position qu'elle occupe à l'égard de la première, on peut juger si le quartz est positif ou négatif. En effet, les rayons envoyés par l'objet que l'on regarde, tombant perpendiculairement sur la face d'entrée, ne se séparent pas dans le prisme; mais cela n'empêche pas qu'ils n'aient des indices de réfraction différents, et aussi différents qu'il soit possible, puisque c'est une section perpendiculaire à l'axe; ils se présentent donc dans des conditions différentes sur la face oblique du prisme de verre. Le quartz étant *positif*, son indice extraordinaire est plus grand que l'indice ordinaire; par conséquent en passant dans le verre, il doit se rapprocher plus de la normale que le rayon ordinaire, ou s'en écarter davantage, suivant que l'indice de réfraction du verre est lui-même moindre ou plus grand que l'indice ordinaire du quartz. Ce serait le contraire pour un cristal négatif. Il suffit donc de connaître l'indice ordinaire d'un cristal et l'indice de la substance avec laquelle on

Digitized by Google

l'achromatise, pour juger par l'expérience précédente si le cristal est positif ou négatif.

4° **Expériences des rhomboïdes superposés et des prismes bi-réfringents.** — Lorsqu'on superpose deux rhomboïdes pour regarder des objets au travers de leur double épaisseur, on observe les phénomènes suivants : quand les sections principales de ces deux rhomboïdes sont parallèles ou perpendiculaires, on ne voit que deux images de l'objet, comme si le rhomboïde était seul; mais l'on en voit quatre images diversement intenses dans toutes les autres positions relatives des deux sections principales.

Nous devons conclure de là que les deux rayons ordinaire et extraordinaire qui sortent d'un premier rhomboïde ont une propriété qui les distingue essentiellement d'un rayon de lumière naturelle, puisque celui-ci donne toujours deux images égales en traversant un rhomboïde.

Pour mieux analyser cette propriété distinctive, on peut employer la lumière solaire, et placer le second rhomboïde assez loin du premier pour agir séparément sur les rayons ordinaire et extraordinaire auxquels il a donné naissance.

Alors on reconnaît : 1° que, si les sections principales sont parallèles, le *rayon ordinaire* du premier cristal se réfracte tout entier *ordinairement* dans le deuxième, et que le *rayon extraordinaire* se réfracte aussi tout entier *extraordinairement;* 2° que, si les sections principales sont perpendiculaires, le *rayon ordinaire* du premier cristal se réfracte tout entier *extraordinairement* dans le second, tandis que le *rayon extraordinaire* se réfracte tout entier *ordinairement;* 3° que, si les sections principales font entre elles un angle de 45°, chacun des rayons ordinaire et extraordinaire du premier cristal se divise dans le second en deux faisceaux égaux; 4° que, dans les autres situations relatives des deux sections principales, chacun des faisceaux du premier cristal donne naissance à deux faisceaux inégaux dans le second.

Dans toutes les expériences de cette espèce, on peut avec avantage substituer aux rhomboïdes des prismes de chaux carbonatée ou de cristal de roche, achromatisés avec du verre; c'est ce que nous appellerons des prismes *bi-réfringents.* Ils doivent être travaillés de manière que l'axe optique soit parallèle ou perpendiculaire à l'arête du sommet; alors, en donnant

Digitized by Google

aux faces latérales des inclinaisons convenables, on obtient des séparations plus ou moins grandes entre les deux images, et rien n'est plus facile que d'observer et d'analyser chacune d'elles en particulier; mais l'on conçoit que jamais les deux images ne peuvent être à la fois complétement achromatisées, puisqu'elles proviennent de puissances réfractives différentes.

5° Expérience de réflexion à la seconde surface des corps doublement réfringents, et prisme de Nicol. — Quand un faisceau de lumière se réfléchit à la seconde surface d'un corps doué de la double réfraction, il présente des phénomènes particuliers qui tiennent aux propriétés dont nous venons de parler. En arrivant à cette seconde surface, le faisceau est ordinaire ou extraordinaire, puisqu'il vient de traverser un cristal, et, après la réflexion, il se trouve dans le même cas qu'un faisceau ordinaire ou extraordinaire qui se présente pour pénétrer dans un second cristal. De là les différentes apparences des images réfléchies, suivant les positions relatives de l'œil, du plan de réflexion, et de la section principale du cristal. Tous ces effets peuvent être facilement analysés au moyen du prisme *bi-réfringent*.

Le *prisme de Nicol*, représenté dans la figure 8, est une conséquence de la réflexion totale; on le construit de la manière suivante : on prend un long parallélipipède de chaux carbonatée, on le coupe en deux par un plan perpendiculaire au plan des grandes diagonales des bases, et passant par les sommets obtus les plus rapprochés; puis on rejoint les deux moitiés, dans le même ordre, avec du baume de Canada. L'on a alors ce qu'on appelle le *prisme de Nicol*, mais c'est en réalité un véritable parallélipipède. On voit toutefois que la lumière qui entre par l'une ou l'autre des bases tombe très-obliquement sur le baume de Canada; or, son indice de réfraction est plus petit que l'indice ordinaire de la chaux carbonatée, mais plus grand que l'indice extraordinaire; il en résulte que le rayon ordinaire éprouve la réflexion totale, tandis que le rayon extraordinaire passe pour sortir de l'autre base. Le *prisme de Nicol* ne laisse donc passer que l'image extraordinaire des objets que l'on regarde. Il devient ainsi un moyen de distinguer l'image ordinaire de l'image extraordinaire produite par un cristal; il suffit de mettre dans le même plan la section principale du cristal et du prisme de Nicol; l'image unique qui passe est l'image extraordi-

naire; si les deux sections principales sont perpendiculaires, l'image qui passe est l'image ordinaire, qui est devenue extraordinaire en traversant le prisme; si les deux sections sont à 45°, on observe alors deux images de même intensité.

6º La tourmaline jouit aussi d'une propriété bien précieuse pour l'étude des phénomènes de double réfraction et de polarisation : quand elle est taillée en lames à faces parallèles entre elles, et parallèles à l'axe, elle agit comme le prisme de Nicol, c'est-à-dire qu'elle ne laisse passer que l'image extraordinaire; la lumière de l'image ordinaire est ici *complétement absorbée*. C'est à M. Biot que l'on doit cette importante observation; elle date de 1815, et depuis cette époque il y a peu de découvertes sur la polarisation où la tourmaline n'ait eu une part plus ou moins considérable. Rien n'est plus commode pour reconnaître si un faisceau contient de la lumière polarisée et pour déterminer la direction du plan de polarisation.

183. Double réfraction du verre comprimé. — Après avoir exposé les principaux phénomènes de la double réfraction dans les cristaux, nous devons donner une idée des causes accidentelles qui peuvent agir sur la plupart des corps diaphanes pour les rendre aussi doublement réfringents. Ces indications n'auront pas seulement pour objet de nous faire connaître des faits nouveaux; elles serviront encore à nous montrer d'une manière évidente que la division des rayons dans les corps doublement réfringents est produite par l'inégale élasticité que possède l'éther dans les différentes directions, et que cette inégale élasticité résulte elle-même de la forme des molécules, de leur distance relative et de leur arrangement particulier. Voici l'expérience que Fresnel a imaginée pour démontrer cette vérité importante.

Quatre prismes rectangulaires de verre *a*, *b*, *c*, *d*, parfaitement égaux entre eux, sont posés à côté l'un de l'autre sur un plan horizontal, par leur face hypoténuse (Fig. 9). D'un côté et de l'autre, on applique contre les quatre bouts des bandes de carton, et sur elles des bandes très-rigides d'acier; puis on les comprime très-fortement dans un étau convenable, de telle sorte que la compression s'exerce dans le sens de l'axe des prismes pour en diminuer la longueur. Pendant que le verre est ainsi maintenu dans un état forcé, on ajuste trois autres prismes rectangulaires *e*, *f*, *g*, et deux prismes *h*, *k*, de 45°, pour compléter un parallélipipède allongé dont les faces extrê-

Digitized by Google

mes s, s' soient parallèles; les faces latérales de tous ces derniers prismes sont collées aux faces latérales des premiers avec du mastic en larmes, afin d'éviter les réflexions partielles.

Ce système, ainsi composé, est doué de la double réfraction. Une petite mire, placée à un mètre du côté de la face s', par exemple, est vue double par l'œil qui regarde contre la face s, et l'écart des deux images peut être de 1 millimètre ou même davantage. On peut du reste s'assurer que chacun des deux faisceaux jouit bien de tous les caractères des faisceaux doublement réfractés. Or, il est bien évident que, dans ce cas, la double réfraction est produite par l'inégale élasticité de l'éther, dans le verre comprimé et dans celui qui ne l'est pas.

Nous verrons à la fin de la polarisation beaucoup de phénomènes très-curieux qui résultent d'une véritable double réfraction dans un grand nombre de corps diaphanes non cristallisés; mais, si cette double réfraction est assez forte pour produire de vives couleurs, elle est trop faible pour être observée directement.

Pour compléter l'exposition des principaux phénomènes qui appartiennent exclusivement à la double réfraction, nous indiquerons encore ici comment le principe de la division des rayons peut être utilement appliqué à la mesure des petits angles : c'est Rochon qui a réalisé le premier cette ingénieuse application, en 1777, dans un instrument que l'on appelle aujourd'hui *micromètre à double image* ou *lunette de Rochon*.

184. Micromètre à double image. — Concevons deux prismes de cristal de roche (Fig. 10), l'axe du premier, *asb*, étant perpendiculaire à la face *sb*, et l'axe du second étant, au contraire, parallèle aux faces latérales *as'*, *bs'* et *ab*; supposons que leurs angles réfringents *abs* et *bas'* soient égaux, et qu'on les ait réunis par la face *ab*, avec du mastic en larmes, de telle sorte qu'ils composent un seul système dont les faces *as'* et *sb* soient exactement parallèles.

Un faisceau de lumière, tombant perpendiculairement sur *sb*, pénétrera sans déviation ni bifurcation jusqu'à la face *ab*; mais là, il sera décomposé en deux faisceaux distincts : l'un, ordinaire, qui suivra sa route *ovo'* en ligne droite; l'autre, extraordinaire, qui sera dévié et prendra la route *vtx*, en faisant, après son émergence, un angle $xtq' = e$ avec la normale ou avec le faisceau ordinaire *vo'*. En plaçant l'œil derrière la face *as'*, on

verra donc une double image du point qui envoie la lumière, et ces deux images seront vues sous l'angle e. Les faisceaux envoyés par les points voisins éprouveront le même effet puisqu'ils seront très-peu obliques sur la surface sb, et l'œil verra ainsi une double image des objets qui sont dans le champ de vision, sans qu'il y ait de déformation sensible, du moins pour ceux de ces objets qui envoient la lumière sous une petite obliquité.

Pour déterminer l'*angle de duplication*, e, qui appartient au système des prismes, désignons par i, r, i', les angles ovp, tvp', vtq; par a les angles réfringents, sba, $s'ab$, en sorte que $i = a$ et $i' = a - r$; et par n, n', les indices de réfraction ordinaire et extraordinaire : il est facile de voir que l'on aura alors :

$$\frac{\sin a}{\sin r} = \frac{n'}{n} \quad \text{et} \quad \frac{\sin e}{\sin(a-r)} = n';$$

on a d'ailleurs $n' = 1{,}5582$, et $n = 1{,}5484$. Ainsi, après avoir déterminé par les procédés ordinaires l'angle a des prismes, la première équation donnera r, et, cette valeur étant substituée dans la deuxième équation, l'on en déduira la valeur de e. Ces valeurs seront de 19′ 30″, 28′ 20″, 40′ 0″, 57′ 40″, pour des valeurs de a de 30°, 40°, 50°, 60°.

Au lieu de déterminer par le calcul l'angle de duplication d'un prisme donné, on peut aisément le déterminer par l'observation : il suffit pour cela d'éloigner une mire circulaire ayant un diamètre connu d, jusqu'à une distance connue z, telle que, en la regardant avec le prisme, ses deux images soient tangentes l'une à l'autre ; alors, il est évident que l'angle de duplication e est égal à l'angle sous lequel on voit la mire à l'œil nu à cette distance z; ainsi, l'on a :

$$\text{tang}\, e = \frac{d}{z};$$

réciproquement, l'angle e étant connu, on pourrait déterminer d au moyen de z, ou z au moyen de d, pour un objet dont les images seraient en contact.

Le prisme dont il s'agit peut s'appliquer de diverses manières aux lunettes. Dans le micromètre de Rochon, le prisme est dans le tube de la lunette, entre l'objectif et l'oculaire (Fig. 11), et il peut se mouvoir à volonté, en restant toujours dans l'axe ; on l'approche du foyer de l'objectif jusqu'à une distance $fz = h$

telle que les deux images fm, $f'm'$ de l'objet qu'on veut mesurer (Fig. 11), soient au contact (Fig. 12) ; alors, entre l'angle visuel $fcm = v$ et l'angle de duplication $fzm = e$, on a évidemment la relation

$$\tang v = \frac{h}{f} \tang e, \quad \text{ou} \quad v = \frac{he}{f};$$

f est la distance focale fc de l'objectif : e est déterminé par l'un des moyens que nous venons d'indiquer ; ainsi, il ne reste d'inconnu que la valeur de h, qui pourrait se mesurer directement sur le tube.

Cependant, il est plus exact de procéder à la graduation de la manière suivante : on regarde avec la lunette une mire circulaire dont on connaît le diamètre et la distance, et qui sous-tend par conséquent un angle connu de 20 ou 30′ ; on met le prisme au point où il ne fait voir qu'une seule image, c'est le zéro de l'instrument ; ensuite on le fait marcher vers l'objectif, jusqu'au point où les deux images sont en contact : sachant alors que l'angle visuel v est de 30′ par exemple, on marque 30 sur le tube, au point où se trouve le repère du prisme, et l'on divise en 30 parties égales l'intervalle depuis 0, en continuant les divisions au delà de 30 ; en visant un autre objet après avoir mis ses deux images en contact, il suffit de lire la division correspondante au repère du prisme, c'est l'angle visuel de cet objet.

A côté de ces divisions angulaires se trouvent encore écrits sur le tube d'autres nombres qui expriment le rapport entre la distance et la grandeur d'un objet. Ainsi, à côté de 4′ est écrit 859, ce qui signifie que la distance d'un objet est 859 fois sa grandeur quand il est vu sous un angle de 4′ ; ainsi, au moyen de cette seconde division, le micromètre à double image donne la distance d'un objet dont on connaît la grandeur, ou, réciproquement, la grandeur d'un objet dont on connaît la distance.

M. Arago, qui s'est servi de cet instrument pour mesurer les diamètres des planètes, a trouvé de l'avantage à mettre le prisme entre l'oculaire et l'œil : mais alors il faut employer un oculaire particulier dont les verres soient mobiles pour changer à volonté les grossissements. Par là on arrive, comme dans le cas précédent, à établir le contact des deux images : le grossissement g qui atteint ce but, étant connu par la position respective des

verres de l'oculaire, il est facile d'en déduire le diamètre apparent d de l'astre ou de l'objet, car on a alors :

$$e = dg.$$

Réciproquement, on pourrait déterminer par ce procédé le grossissement d'une lunette : mais pour cela il faudrait éloigner une mire circulaire jusqu'à ce que ses deux images fussent en contact lorsqu'on les regarde avec le prisme placé au-devant de l'oculaire; connaissant alors son diamètre apparent d' et l'angle e, on en déduirait g.

Ce même procédé pourrait encore être appliqué aux microscopes : pour cela, il faudrait placer devant les lentilles objectives un micromètre de verre et le mettre au foyer; puis, au lieu de l'observer avec la chambre claire, on l'observerait avec le prisme de Rochon, en le tournant de manière que les deux images fussent dans la même ligne; alors on reconnaîtrait la fraction m de millimètre dont l'une des images dépasse l'autre; c'est cette fraction amplifiée et devenue g fois plus grande, qui, à la distance de la vision distincte d, forme la tangente de l'angle de duplication; ainsi on a :

$$1 : \tang e :: d : gm, \quad \text{d'où} \quad g = \frac{d \tang e}{m}.$$

Le prisme de la figure 10, qui nous a servi à démontrer les propriétés du micromètre à double image, peut être employé de deux manières : ou en prenant, comme nous l'avons fait, les faces sb ou as' pour faces d'entrée et de sortie de la lumière, ou en prenant au contraire les faces sa et bs'. Il est facile de voir, d'après ce que nous avons dit (181), qu'il y a de l'avantage à employer cette seconde direction, parce que la séparation des images est beaucoup plus grande.

CHAPITRE II.

Phénomènes généraux et lois générales de la polarisation.

185. Polarisation par réflexions. — Lorsqu'un pinceau de lumière a été réfléchi sur une plaque de verre en faisant avec la surface un angle de 35° 25′, on dit qu'il est *polarisé*, parce qu'il présente alors des propriétés singulières que l'on n'observe pas dans la lumière naturelle. Voici celles de ces propriétés que nous prendrons pour caractéristiques :

1° Il ne donne qu'*une seule image* en passant au travers d'un prisme bi-réfringent, quand la section principale de ce prisme est parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion, tandis qu'il donne deux images plus ou moins intenses dans toutes les autres positions;

2° Il n'éprouve *aucune réflexion* en tombant sur une seconde lame de verre, sous le même angle de 35° 25′, quand le plan d'incidence sur cette seconde lame est perpendiculaire au plan d'incidence sur la première, tandis qu'il se réfléchit partiellement dans d'autres plans et sous d'autres incidences;

3° Il *s'éteint* en tombant perpendiculairement sur une plaque de tourmaline dont l'axe est parallèle au plan de réflexion, tandis qu'il se transmet avec une intensité croissante à mesure que l'axe de la tourmaline approche d'être perpendiculaire au plan de réflexion.

Pour démontrer ces vérités par l'expérience, on peut employer l'appareil qui est représenté dans la figure 13 :

t, tube de laiton, ayant environ 20 centimètres de longueur et 4 centimètres de diamètre, aux deux extrémités duquel s'adaptent diverses pièces qui sont représentées à part, un peu au-dessous du tube en *g*, *s*, *r*, *p*, *q* ; *g* et *s* s'adaptent successivement à l'extrémité *n*, on les appelle *polariseurs;* *r*, *p*, *q*, s'adaptent de même à l'extrémité *n′*, du côté de l'œil, on les appelle *analyseurs*.

Le polariseur *g* est un réflecteur de verre noir, mobile autour d'un axe et monté comme l'indique la figure ; la douille *d* qui

s'adapte sur l'extrémité du tube, porte à l'intérieur un diaphragme dont l'ouverture est un cercle de 4 ou 5 millimètres, et à l'extérieur un repère qui indique sur la division du cercle *n*, l'azimut du plan de réflexion ; quant à l'obliquité de la glace noire par rapport à l'axe du tube, elle est indiquée par une aiguille sur le demi-cercle *h* ; on peut la fixer à 35° 25′.

s est une *pile de glace* ou *pile de plaques*, c'est-à-dire un assemblage de plusieurs verres parallèles, superposés et arrangés obliquement dans leur monture, qui porte aussi un repère et un diaphragme à son extrémité antérieure ;

p est un prisme bi-réfringent ;

q une glace réfléchissante ;

r une tourmaline.

Les montures de ces divers analyseurs portent aussi un repère qui indique leur position angulaire sur le cercle divisé *n′*.

Le tube *t* étant disposé convenablement pour que la lumière du ciel ou la lumière blanche des nuées tombe sur le réflecteur *g*, on incline celui-ci pour que le faisceau réfléchi suivant l'axe du tube fasse un angle de 35° 25′ avec la surface réfléchissante ; alors, en l'observant avec le prisme *p*, on voit en général, deux images de ce faisceau, ou plutôt de l'ouverture du diaphragme ; mais en faisant tourner d'une circonférence entière le prisme et sa monture, il est facile de constater que l'*image est simple*, pour quatre positions du prisme ; savoir : quand sa section principale est parallèle au plan de réflexion, ou quand elle lui est perpendiculaire.

En substituant au prisme la glace *q*, et en observant l'image réfléchie du diaphragme, on voit que cette image s'éteint quand l'incidence sur cette seconde place est aussi de 35° 25′ avec sa surface, et qu'en même temps le plan d'incidence est perpendiculaire au premier plan d'incidence sur la glace *g* : dans toute autre position, l'image réfléchie prend un éclat plus ou moins vif, qui s'affaiblit graduellement à mesure qu'on approche de celle que nous venons de définir.

Enfin, si à la glace *q* on substitue la tourmaline *r*, on voit que l'image du diaphragme est très-brillante quand l'axe de la tourmaline est perpendiculaire au plan de réflexion, qu'elle s'affaiblit peu à peu quand on s'écarte de cette position, et qu'elle s'éteint complétement quand l'axe de la tourmaline est parallèle au plan de réflexion.

Telles sont les propriétés caractéristiques des rayons polarisés : l'une quelconque de ces trois propriétés entraîne essentiellement les deux autres. Ainsi, pour reconnaître si un rayon est polarisé, nous pourrons nous contenter désormais de l'observer avec la plaque de tourmaline ou avec le prisme bi-réfringent.

On est convenu d'appeler *plan de polarisation* le plan suivant lequel a été réfléchie la lumière qui se trouve polarisée par réflexion; mais, comme on pourrait avoir à étudier un rayon polarisé dont on ne connaîtrait pas l'origine, il a été nécessaire, tout en conservant cette définition, d'en faire une autre équivalente, ou plutôt d'indiquer un autre caractère pour reconnaître le plan de la polarisation; et la plaque de tourmaline est très-commode pour cet usage. Quand un rayon s'éteint en traversant la tourmaline, son plan de polarisation est parallèle à l'axe de la plaque; quand au contraire, un rayon a son maximum d'intensité en traversant la tourmaline, son plan de polarisation est perpendiculaire à l'axe de la plaque.

Les expériences que nous venons de faire avec la lumière des nuées peuvent être faites par une lumière quelconque, artificielle ou naturelle; il est même facile aussi de les faire dans la chambre noire avec la lumière solaire; alors, on projette les images sur un tableau éloigné : dans ce cas, les expériences deviennent un peu plus faciles, en se servant du trait de lumière horizontal réfléchi par un héliostat ou par un porte-lumière, et en substituant à la première glace *g* ou un prisme bi-réfringent, ou une tourmaline, ou une pile de glace *s*, comme nous l'indiquerons tout à l'heure.

La découverte de la polarisation, dont nous venons de donner une première idée, a été faite par Malus en 1810; jusque-là personne n'avait soupçonné que la réflexion pût imprimer à la lumière des caractères particuliers. S'il suffisait d'une prodigieuse sagacité pour découvrir et analyser des propriétés si nouvelles et si extraordinaires, il fallait certainement un génie bien pénétrant pour développer ces propriétés, comme le fit Malus, et pour montrer aux physiciens qu'elles ouvraient en optique une carrière immense par son étendue et par sa richesse.

A l'époque de cette découverte, le système de l'émission était complétement dominant; on ne voyait en optique que des molécules lumineuses douées de divers accès et de diverses propriétés; toutes ces molécules éprouvant simultanément les mêmes

effets lorsqu'elles avaient été réfléchies sur le verre sous un certain angle, on supposait qu'elles étaient toutes *tournées* de la même manière, et qu'en conséquence elles avaient des axes de rotation et des *pôles* autour desquels leurs mouvements pouvaient s'accomplir sous certaines influences. De là le mot de *polarisation*, qui indiquait que les pôles étaient dirigés ou arrangés de la même manière pour toutes les molécules.

186. Polarisation par simple réfraction. — La lumière naturelle se polarise en traversant sous certaines conditions une série de plaques de verre à faces parallèles, et son plan de polarisation est alors perpendiculaire au plan d'émergence : pour le démontrer, on substitue au réflecteur *g*, la *pile de plaques s*; alors, si l'on soumet à l'épreuve le pinceau transmis par cet appareil, en l'observant par l'un des trois moyens indiqués précédemment, il est facile de reconnaître qu'il est polarisé quand il pénètre dans les glaces en faisant avec leurs surfaces un angle de 35° 25', et, comme il a son maximum d'intensité quand l'axe de la tourmaline est parallèle au plan d'émergence, on en conclut que le plan de polarisation est perpendiculaire à ce plan. Si la lumière est très-vive, elle n'est pas complétement polarisée, et il faut alors employer dans la pile un plus grand nombre de glaces.

Les autres corps transparents et non cristallisés présentent des phénomènes analogues : seulement, pour obtenir le maximum de polarisation, il faut que l'incidence varie avec la nature de la substance.

187. Polarisation par double réfraction. — Les deux faisceaux ordinaire et extraordinaire que donne la lumière naturelle en traversant la section principale d'un cristal, sont l'un et l'autre polarisés : le premier, dans le plan d'émergence, et le second, perpendiculairement à ce plan.

Pour le démontrer, on substitue au réflecteur *g* (Fig. 13) un prisme bi-réfringent, et l'on observe la lumière transmise avec l'un des analyseurs, *p*, *q*, *r* : si l'on se sert, par exemple, de la tourmaline, on reconnaît facilement que l'image *ordinaire* (celle qui est dans l'axe et non déviée) acquiert son maximum d'intensité quand l'axe de la tourmaline est perpendiculaire à la section principale du prisme, et qu'elle s'éteint au contraire quand l'axe de la tourmaline est dans la section principale elle-même; l'image *extraordinaire* (celle qui est hors de l'axe et

déviée) présente des phénomènes exactement inverses; ainsi le caractère du faisceau ordinaire est d'avoir son plan de polarisation dans la section principale du prisme bi-réfringent ou en général du cristal polarisant; et le caractère du rayon extraordinaire est d'avoir son plan de polarisation perpendiculaire à la section principale.

188. Polarisation par réflexion irrégulière ou par diffusion. — Lorsqu'une surface quelconque est éclairée par une vive lumière, les rayons irrégulièrement réfléchis ou *diffusés* qu'elle renvoie dans tous les sens, se trouvent partiellement polarisés. Pour s'en assurer, il suffit de faire tomber dans la chambre noire un trait de lumière solaire sur une surface polie ou mate, et de regarder cette surface avec une plaque de tourmaline que l'on fait tourner dans son plan pour rendre l'axe tantôt parallèle, tantôt perpendiculaire au plan d'émergence des rayons. Dans le premier cas, l'éclat de la surface sera très-sensiblement plus vif que dans le second; ce qui prouve que la lumière est en partie polarisée dans le plan perpendiculaire au plan d'émergence, comme M. Arago l'a reconnu, quand la diffusion se fait sur une surface polie; mais MM. de La Provostaye et Desains, en faisant une étude particulière de ces phénomènes (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXIV, ann. 1852), ont constaté que le plan de polarisation se trouve dans le plan d'émergence quand la diffusion se fait sur une surface mate; ainsi l'état plus ou moins spéculaire de la surface exerce une influence, et sur le sens de la polarisation et sur son intensité.

189. Polarisation de la lumière atmosphérique. — Il résulte de tout ce qui précède, que la lumière n'est presque jamais réfléchie ou réfractée sans être plus ou moins polarisée; on peut s'attendre par conséquent à reconnaître une polarisation plus ou moins complète dans la lumière atmosphérique : c'est ce qui arrive en effet, surtout quand le ciel est serein, et, pour s'en assurer, il suffit de regarder les différents points du ciel avec une tourmaline que l'on fait tourner dans son plan. Lorsque l'image qu'on aperçoit a le même éclat dans toutes les positions de l'axe, il n'y a pas de polarisation; mais si, dans deux positions rectangulaires, il y a une différence d'éclat, la lumière qui vient de cette région du ciel est plus ou moins polarisée, et le plan de polarisation est perpendiculaire à l'axe

de la tourmaline, au moment où elle donne l'image la plus brillante.

190. Loi de M. Brewster sur l'angle de polarisation. — L'angle sous lequel les diverses surfaces réfléchissantes polarisent la lumière en plus grande proportion se détermine, soit avec le goniomètre de Charles, soit avec un autre instrument quelconque propre à mesurer les angles : il suffit, pour cela, de disposer convenablement la surface que l'on veut soumettre à l'expérience, et d'observer le faisceau réfléchi avec une tourmaline dont l'axe soit perpendiculaire au plan de réflexion ; l'angle d'incidence pour lequel l'image vue dans la tourmaline s'éteint ou prend le moindre éclat est l'angle cherché. On avait fait ainsi beaucoup d'expériences, lorsque M. Brewster, en comparant leurs résultats, fut conduit à découvrir la loi remarquable à laquelle ils sont soumis. Cette loi est la suivante :

La tangente de l'angle de polarisation est égale à l'indice de réfraction, ou, ce qui revient au même, *l'angle de polarisation est celui pour lequel le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté correspondant.*

En effet, si l'on désigne par n l'indice de réfraction d'une substance, par p son angle de polarisation, et par r l'angle de réfraction correspondant, on aura, par le premier énoncé de la loi de Brewster, et par la loi ordinaire de réfraction :

$$\text{tang}\, p = n \quad \text{et} \quad \sin p = n \sin r,$$

ce qui donne $\cos p = \sin r$, et par conséquent $r + p = 90°$, conformément au second énoncé.

Quand la réflexion s'accomplit dans l'intérieur d'une substance, l'indice de réfraction devient $\frac{1}{n}$, et il exprime encore la tangente de l'angle sous lequel la réflexion intérieure donne la polarisation la plus complète.

En représentant par si (Fig. 14) le rayon incident, sous l'angle de polarisation complète, on voit, pour la première surface, que les rayons réfléchis et réfractés correspondants, if et ir, sont perpendiculaires entre eux, et qu'il en est de même à la seconde surface pour les rayons rf' et rs'.

Il suffit donc de connaître l'indice de réfraction d'une substance pour calculer son angle de polarisation ; et réciproquement, l'angle de polarisation étant connu pour un corps quel-

conque, il est facile d'en déduire l'indice de réfraction de ce corps.

Les substances doublement réfringentes ayant des indices de réfraction qui changent avec la grandeur des angles et la direction des plans d'incidence, il est présumable que les angles de polarisation doivent présenter alors quelques phénomènes particuliers; mais je ne connais, jusqu'à présent, aucune observation précise à cet égard.

Les indices de réfraction prenant des valeurs différentes pour les différentes couleurs, il en résulte qu'à la rigueur tous les rayons du spectre ne doivent pas se polariser par réflexion exactement sous le même angle.

191. Loi de Malus sur le partage de la lumière polarisée. — Lorsqu'un faisceau de lumière polarisée traverse un prisme bi-réfringent, nous avons vu qu'il est simple à son émergence, quand la section principale du prisme fait avec le plan de polarisation des angles 0, 90, 180 ou 270°, c'est-à-dire quand elle lui est parallèle ou perpendiculaire; mais, dans toutes les autres positions, il y a une image ordinaire et une image extraordinaire qui changent d'éclat relatif, et qui s'éteignent tour à tour lorsqu'on arrive aux positions précédentes. Malus avait été conduit à représenter ces changements d'intensité par la formule suivante :

$$r = t\cos^2 a$$
$$x = t\sin^2 a;$$

a étant l'angle de la section principale du prisme avec le plan de polarisation, t l'intensité du faisceau incident, r l'intensité du faisceau ordinaire, et x celle du faisceau extraordinaire; ces deux faisceaux émergents se distinguent par ce caractère : le premier r est toujours polarisé dans le plan de la section principale, et le second x perpendiculairement à cette section; la désignation de ces faisceaux en ordinaire et extraordinaire suffit donc pour indiquer leurs plans de polarisation.

Il en résulte 1° que la somme des intensités de ces deux faisceaux est toujours égale à l'intensité de la lumière incidente, car $r + x = t$.

2° Que pour $a = 0$, l'on a $r = t$, et $x = 0$; à mesure que l'angle a augmente, r diminue, x augmente, et pour $a = 45°$, $r = \frac{1}{2}$ et $x = \frac{1}{2}$; au delà, x l'emporte sur r et enfin pour $a = 90°$,

l'on a $r = 0$ et $x = t$; c'est-à-dire que si la section principale est perpendiculaire au plan primitif de polarisation, le faisceau ordinaire s'éteint et le faisceau extraordinaire a tout l'éclat du faisceau incident; mais son plan de polarisation n'est pas changé, il coïncide avec le plan primitif puisqu'il est perpendiculaire à la section principale.

Cette loi remarquable, qui n'était d'abord qu'un moyen empirique de représenter les apparences, a été démontrée expérimentalement par M. Arago, et se trouve de plus justifiée par la théorie (voy. chap. v, propos. III).

Il résulte aussi de la même théorie qu'*un faisceau de lumière naturelle d'une intensité égale à* 1, *peut toujours être considéré comme étant la réunion des deux faisceaux polarisés à angle droit, ayant chacun une intensité* $\frac{1}{2}$, *l'azimut de l'un de ces plans de polarisation étant arbitraire* (voy. chap. v, propos. VIII).

En effet, quand un faisceau naturel d'intensité 1 tombe sur un prisme bi-réfringent, il donne naissance à deux faisceaux, l'un d'intensité $\frac{1}{2}$ qui est polarisé dans la section principale, l'autre d'intensité $\frac{1}{2}$ polarisé perpendiculairement à la section principale. Or, si on regarde le faisceau naturel comme composé de deux faisceaux d'intensité $\frac{1}{2}$ et polarisés à angle droit, le plan de polarisation du premier, faisant par exemple un angle quelconque a avec la section principale du prisme, le plan de polarisation du second fera alors avec cette section un angle de $90^o - a$; et le prisme agissant sur le premier donnera à l'émergence un rayon ordinaire $r = \frac{\cos^2 a}{2}$ et un rayon extraordinaire $x = \frac{\sin^2 a}{2}$; agissant sur le second, il donnera un rayon ordinaire

$$r' = \frac{\cos^2(90 - a)}{2} = \frac{\sin^2 a}{2}$$

et un rayon extraordinaire

$$x' = \frac{\sin^2(90 - a)}{2} = \frac{\cos^2 a}{2}.$$

Ainsi en définitive le rayon ordinaire sera

$$r + r' = \frac{\cos^2 a + \sin^2 a}{2} = \frac{1}{2}$$

et le rayon extraordinaire

$$x + x' = \frac{\sin^2 a + \cos^2 a}{2} = \frac{1}{2};$$

c'est-à-dire le même résultat que pour le rayon naturel d'intensité 1.

Si l'on suppose, en général, qu'un rayon de lumière polarisée d'intensité t traverse un premier prisme bi-réfringent dont la section principale fasse un angle a avec le plan de polarisation, et ensuite un second prisme bi-réfringent dont la section principale soit parallèle à ce plan primitif de polarisation, il est facile de déterminer les intensités et les plans de polarisation des faisceaux émergents.

Car, au sortir du premier prisme il y aura un faisceau ordinaire $r = t \cos^2 a$, et un faisceau extraordinaire $x = t \sin^2 a$.

Le deuxième prisme agissant sur r donnera deux faisceaux $r' = r \cos^2 a$, $x' = r \sin^2 a$; agissant sur x il donnera aussi deux faisceaux, savoir : $r_1' = x \sin^2 a$, $x_1' = x \cos^2 a$; par conséquent il y aura en général quatre faisceaux émergents, deux ordinaires r' et r_1' polarisés dans la section principale du second prisme, et deux extraordinaires x' et x_1' polarisés perpendiculairement à cette section.

Rayons ordinaires. . . . $\begin{cases} r' = r \cos^2 a = t \cos^4 a \\ r_1' = x \sin^2 a = t \sin^4 a \end{cases}$

Rayons extraordinaires $\begin{cases} x' = r \sin^2 a = t \cos^2 a \sin^2 a \\ x_1' = x \cos^2 a = t \cos^2 a \sin^2 a \end{cases}$

Il est facile de voir que la somme de ces quatre faisceaux reproduit l'intensité primitive t.

Il est bon de remarquer que les deux faisceaux extraordinaires x' et x_1' sont toujours égaux, tandis que les deux faisceaux ordinaires r' et r_1' ne sont égaux que pour $a = 45°$.

Ce serait l'inverse si le second prisme avait sa section principale perpendiculaire au plan primitif de polarisation.

Ces quatre faisceaux se réduisent à un seul pour $a = 0$ et pour $a = 90°$.

Pour que ces formules soient exactes, il n'est aucunement nécessaire que les faisceaux soient distincts et séparés l'un de l'autre; ils peuvent être superposés en partie, ou même entièrement confondus : dans ce dernier cas, les formules donnent encore l'intensité de la portion du faisceau émergent qui est ordinaire ou polarisée dans la section principale du second prisme, et celle de la portion qui est extraordinaire ou polarisée perpendiculairement à cette section principale.

192. Loi de Fresnel sur l'intensité de la lumière réfléchie. — La quantité de lumière réfléchie par les surfaces polies augmente sans cesse avec l'obliquité de l'incidence : c'est un fait que l'on peut constater aisément par des expériences approximatives ; mais avant les recherches dont nous allons parler, l'on n'avait encore, ni une méthode expérimentale pour comparer rigoureusement les intensités correspondantes aux diverses obliquités, ni une formule générale pour exprimer dans tous les cas le rapport qui existe entre la lumière incidente et la lumière réfléchie. Les phénomènes de la polarisation ont conduit à cette double solution du problème. M. Arago a imaginé la première, et Fresnel la seconde. La formule de Fresnel repose sur des considérations qui sont développées (chap. v, prop. xii). Cette formule est la suivante :

$$t = \frac{\sin^2(i-i')}{\sin^2(i+i')}\cdot\cos^2 a + \frac{\tang^2(i-i')}{\tang^2(i+i')}\cdot\sin^2 a.$$

L'intensité de la lumière incidente est prise pour unité : t, intensité de la lumière réfléchie ; a, *azimut* du plan de polarisation de la lumière incidente, ou angle de ce plan avec le plan d'incidence ou de réflexion ; i, angle d'incidence ; i', angle de réfraction correspondant et toujours lié à i par la relation $\sin i = n \sin i'$, n étant l'indice de réfraction de la substance réfléchissante par rapport au milieu dans lequel s'accomplit la réflexion.

Au moyen de ces deux relations entre les cinq quantités, n, i, i', a, t, on peut donc toujours en déterminer deux, lorsque les trois autres sont connues ; ce qui donne lieu à une foule d'applications dont il suffit d'indiquer ici le principe.

Il y a plus : la formule s'étend aussi à la lumière naturelle ; en effet, puisqu'un faisceau de lumière naturelle d'une intensité 1 peut toujours être considéré comme étant la réunion de deux faisceaux polarisés à angle droit, ayant chacun une intensité $\frac{1}{2}$, prenons deux faisceaux remplissant ces conditions. Le premier, considéré comme polarisé dans le plan d'incidence, donnera a la réflexion une intensité $\frac{1}{2}\cdot\frac{\sin^2(i-i')}{\sin^2(i+i')}$, puisque $a=0$. Le second, polarisé perpendiculairement au plan d'incidence, donnera une intensité $\frac{1}{2}\cdot\frac{\tang^2(i-i')}{\tang^2(i+i')}$, puisque $a = 90$. Et, comme

ils sont polarisés à angle droit, l'intensité totale sera égale à la somme des intensités réunies, ce qui donne :

$$t = \frac{1}{2}\left[\frac{\sin^2(i-i')}{\sin^2(i+i')} + \frac{\text{tang}^2(i-i')}{\text{tang}^2(i-i')}\right].$$

Ainsi, dès que l'on connaît i et n, on peut déterminer t par le calcul.

Pour l'incidence perpendiculaire on aurait $i=0$, $i'=0$, et la formule donnerait $\frac{0}{0}$ mais, pour en avoir la vraie valeur, il faut remarquer que, pour de petites incidences, on peut prendre les angles au lieu des sinus et des tangentes, et qu'alors $i=ni'$, ce qui donne :

$$t = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2.$$

Les deux portions qui constituent le faisceau réfléchi sont inégales. La première est toujours plus grande que la seconde, et si l'on divise leur différence par leur somme, on obtient pour résultat :

$$\frac{\cos^2(i-i') - \cos^2(i+i')}{\cos^2(i-i') + \cos^2(i+i')},$$

qui exprime la proportion de lumière réfléchie qui se trouve polarisée dans le plan de réflexion. Or, cette proportion atteint son maximum par $i+i'=90$, et devient alors égale à 1, d'où il résulte une preuve directe de l'exactitude de la loi de Brewster sur l'angle de polarisation.

193. Mouvement du plan de polarisation par l'effet de la réflexion. — Lorsqu'un rayon de lumière polarisée se réfléchit sur une surface polie sous diverses obliquités, la portion réfléchie se trouve encore polarisée : mais il arrive, en général, que son plan de polarisation a changé d'azimut, ou qu'il a pris un mouvement d'un certain nombre de degrés. Ce nouvel azimut est donné par la formule :

$$\text{tang } a' = \text{tang } a \frac{\cos(i+i')}{\cos(i-i')},$$

a est l'azimut du plan de polarisation dans le rayon incident; a' l'azimut du plan de polarisation dans le rayon réfléchi; i est l'angle d'incidence; i' l'angle de réfraction correspondant donné par la relation $\sin i = n \sin i'$; n étant l'indice de réfraction de la substance réfléchissante.

1° Pour que l'on puisse avoir $a=a'$, il faut que l'on ait

$$\cos(i+i')=\cos(i-i'),$$

condition qui ne peut en réalité être remplie que de deux manières : par $i=0°$ et par $i=90°$; d'où il suit que la réflexion *normale* et la réflexion *rasante* sont les seules qui ne fassent pas changer l'azimut du plan de polarisation, quelle que soit sa valeur.

2° Les angles i et i' étant toujours plus petits que 90°, il en résulte que $\cos(i+i')$ est toujours plus petit que $\cos(i-i')$, et par conséquent toujours plus petit que a, c'est-à-dire que, dans son mouvement, le plan de polarisation se rapproche toujours du plan d'incidence.

3° Lorsque l'on a $i+i'=90°$, ou, ce qui revient au même, quand le rayon tombe sous l'incidence de la polarisation complète, on a toujours $a'=0$.

Ainsi, sous l'angle de la polarisation complète, le rayon réfléchi se trouve toujours polarisé dans le plan d'incidence, quel que soit l'azimut du plan de polarisation du rayon incident.

4° Lorsque l'azimut du plan de polarisation est de 45°, on a

$$\operatorname{tang} a=1 \quad \text{et} \quad \operatorname{tang} a'=\frac{\cos(i+i')}{\cos(i-i')},$$

formule qui a été vérifiée par Fresnel, et qui peut, dans certains cas, très-utilement servir à déterminer l'indice de réfraction, comme l'a fait M. Jamin dans son beau travail sur la réflexion métallique (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XIX, page 301); on en tire en effet

$$\operatorname{tang} a'=\frac{1-\operatorname{tang} i \operatorname{tang} i'}{1+\operatorname{tang} i \operatorname{tang} i'},$$

et

$$\operatorname{tang} i \operatorname{tang} i'=\frac{1-\operatorname{tang} a'}{1+\operatorname{tang} a'}=\operatorname{tang}(45°-a'),$$

relation qui, jointe à $\sin i=n \sin i'$, permet de tirer la valeur de n quand l'azimut a' et l'angle d'incidence i ont été observés avec assez d'exactitude.

Ces divers mouvements du plan de polarisation peuvent être représentés par une construction graphique qui a l'avantage de parler aux yeux.

Prenons une ligne qp (Fig. 15), que nous diviserons en 90 parties égales; supposons que cette ligne représente la direction du

Digitized by Google

plan d'incidence sur la surface réfléchissante, et que les faisceaux incidents tombent successivement en différents points sur cette ligne avec des obliquités marquées par le rang de ces points. Ainsi, au point p, où est écrit 0°, le faisceau tombera perpendiculairement; au point a, il tombera avec une incidence de 20°, avec une incidence de 40° au point b, de 56° au point c, de 70° au point d, et de 90° au point q. Supposons enfin que le plan de polarisation de tous ces faisceaux incidents ait un azimut de 45°; alors la ligne az, dans ses diverses positions, représentera le plan de polarisation du faisceau réfléchi. On voit que c'est à l'incidence de 56° avec la normale, ou de 34° avec la surface, que le plan de polarisation du faisceau réfléchi devient parallèle au plan de réflexion, et que de part et d'autre de cette position, c'est-à-dire, pour des obliquités moindres ou plus grandes, le plan de polarisation change de côté : pour les obliquités moindres, il est à droite du plan d'incidence, et il passe à gauche pour les obliquités plus grandes.

Dans la figure 15, $p'q'$ représente le mouvement du plan de polarisation pour un rayon polarisé ayant aussi un azimut de 45°, mais de l'autre côté du plan d'incidence.

Après avoir représenté graphiquement ce qui arrive aux rayons polarisés dans l'azimut de 45°, soit à droite, soit à gauche du plan de réflexion, il est facile d'en déduire ce qui arrivera à un faisceau de lumière naturelle, car un tel faisceau, d'une intensité égale à 1, peut être regardé comme composé de deux faisceaux ayant chacun une intensité égale à $\frac{1}{2}$, et polarisés à angle droit (191). Or, si nous supposons que l'un de ces faisceaux composants ait son plan de polarisation dans l'azimut de 45°, et à droite du plan d'incidence, l'autre faisceau devra avoir aussi son plan de polarisation dans l'azimut de 45°, mais à gauche du plan d'incidence. Par conséquent les phénomènes de la lumière naturelle ne sont que la *superposition* des phénomènes représentés dans la figure 15, en pq et $p'q'$, comme on peut le voir en $p''q''$. Il en résulte que, sous l'incidence perpendiculaire, le faisceau réfléchi est sans polarisation, comme le faisceau incident; car il est, comme lui, composé de deux faisceaux d'égale intensité et polarisés à angle droit. A mesure que l'incidence augmente, les plans de polarisation se rapprochent graduellement, et, quand la réflexion a lieu sur le verre, ils deviennent enfin parallèles entre eux et au plan de réflexion, pour l'inci-

Digitized by Google

dence de 56°; c'est-à-dire, qu'alors le rayon réfléchi est complétement polarisé dans le plan de réflexion : au delà de cette limite, et pour toutes les incidences plus grandes, chacun des plans de polarisation continue à tourner dans le même sens, celui de droite passant à gauche du plan d'incidence, et celui de gauche passant à droite; et enfin, pour l'incidence de 90°, les deux plans de polarisation se retrouvent perpendiculaires entre eux, chacun ayant repris un azimut de 45° de l'autre côté du plan d'incidence. Ces résultats vont nous servir à expliquer la polarisation partielle et la polarisation complète, qui résultent de plusieurs réflexions successives.

194. Polarisation partielle et polarisation complète produite par plusieurs réflexions successives. — Quand un faisceau de lumière naturelle se réfléchit sous un angle plus grand ou plus petit que celui de la polarisation complète, il présente toutes les apparences d'un faisceau partiellement polarisé. Pour s'en assurer, il suffit de l'observer avec une plaque de tourmaline; car l'image ne disparaît en totalité pour aucune position de la plaque; mais elle change d'intensité à mesure que la plaque tourne dans son plan. On avait regardé d'abord cette lumière mélangée comme composée de deux faisceaux, l'un ayant conservé son état naturel, et l'autre ayant été polarisé dans le plan d'incidence. Mais M. Brewster a fait voir qu'en réalité elle se compose de deux faisceaux égaux et complétement polarisés, l'un à droite, l'autre à gauche du plan de réflexion, l'azimut étant le même pour chacun d'eux, et donné par la formule :

$$\text{tang}\ a' = \frac{\cos(i+i')}{\cos(i-i')},$$

parce que le rayon naturel incident pouvant être considéré comme composé de deux faisceaux polarisés à angle droit, il est permis de prendre pour l'azimut du premier 45° à droite, et pour celui du second 45° à gauche du plan de polarisation, en sorte que tang $a = 1$.

S'il arrive que plusieurs réflexions successives s'accomplissent sous la même incidence et dans le même plan; et si l'on désigne par a', a'', a'''.... a^n, les azimuts du plan de polarisation après la 1re, la 2e, la 3e,.... la ne réflexion, l'on aura donc :

$$\text{tang}\ a' = \frac{\cos(i+i')}{\cos(i-i')},$$

Digitized by Google

$$\text{tang } a'' = \text{tang } a' \frac{\cos(i+i')}{\cos(i-i')},$$

. . . .

$$\text{tang } a^n = \text{tang } a^{n-1} \frac{\cos(i+i')}{\cos(i-i')},$$

et, en multipliant toutes les équations entre elles :

$$\text{tang } a^n = \left[\frac{\cos(i+i')}{\cos(i-i')}\right]^n.$$

Ce dernier azimut ne peut jamais être nul, quel que soit le nombre des réflexions, quand on n'a pas $i + i' = 90°$; mais sa valeur diminue de plus en plus, à mesure que le nombre des réflexions augmente; quand elle n'est plus que de $\frac{1}{2}$ ou 1°, la lumière paraît polarisée à peu près totalement dans le plan d'incidence. Ainsi, sur le verre, sous l'incidence de 70°, cinq réflexions suffisent pour donner une polarisation presque complète.

195. Mouvement du plan de polarisation par l'effet de la réfraction. — La réfraction peut, comme la réflexion, faire changer ou tourner le plan de polarisation. Cet effet est représenté par la figure 16 ; *pq* désigne le plan de réfraction d'une lame de verre à faces parallèles; la longueur de cette ligne a été divisée en 90 parties égales, et le numéro de chacune de ces divisions indique l'angle d'incidence du faisceau qui tombe en ce point pour traverser la plaque après s'y être réfracté. Ainsi, le cercle que l'on aperçoit vis-à-vis le n° 60 représente un faisceau de lumière polarisée qui tombe sur la première surface de la plaque sous un angle de 60° ; le diamètre *az* montre la direction du plan de polarisation de ce faisceau lorsqu'il est devenu émergent dans l'air, après avoir traversé les deux surfaces de la plaque ; il fait ici 50° 7′ avec le plan de réfraction. Au point *p*, ou au numéro 0°, le faisceau tombe à angle droit sur la plaque, et la traverse perpendiculairement; l'expérience montre qu'après l'émergence son plan de polarisation est le même qu'à l'incidence. La figure est faite dans la supposition que ce plan fait un angle de 45° avec le plan de réfraction. Mais, à mesure que l'obliquité augmente, l'azimut du plan de polarisation augmente graduellement : pour une obliquité

de 30°, l'azimut est. 45° 40′,
de 45°............ 46° 47′,
de 60°............ 50° 7′,
de 90°............ 66° 19′.

Digitized by Google

Dans la réflexion, le plan de polarisation se rapprochait du plan d'incidence : ici c'est le contraire, il s'en éloigne de plus en plus, et marque une tendance à lui devenir perpendiculaire. L'effet que l'on observe dans ces expériences est un effet composé, car il résulte de l'action des deux surfaces. Pour savoir ce qui appartient à chacune, il faut expérimenter avec des prismes bien purs, et sous de telles incidences que le rayon émerge perpendiculairement à la seconde surface ; alors, cette surface sera sans action pour changer l'azimut, et l'effet observé sera entièrement dû à l'action de la première.

M. Brewster, qui paraît avoir le premier analysé ces phénomènes, a exprimé la loi de ces mouvements par la formule suivante :

$$\cot a' = \cot a \cos(i - i').$$

a est l'azimut du plan de polarisation du faisceau incident, i l'angle d'incidence ; i' l'angle de réfraction ; a' l'azimut du plan de polarisation, modifié comme il l'a été par l'action de la première surface.

Nous allons appliquer cette formule au cas d'une lame à faces parallèles, en supposant que le faisceau ait son plan de polarisation dans l'azimut de $45°$; alors $\cot a = 1$, et l'on a simplement

$$\cot a' = \cos(i - i').$$

C'est donc avec cet azimut a' pour son plan de polarisation que le rayon s'en va tomber sur la seconde surface avec un angle d'incidence i'; mais, comme l'angle de réfraction est i, et comme $\cos(i'-i) = \cos(i - i')$, le nouvel azimut a'', après cette seconde réfraction, sera donné par l'équation :

$$\cot a'' = \cot a' . \cos(i - i');$$

en la multipliant par la première, on trouve :

$$\cot a'' = \cos^2(i - i').$$

M. Brewster a vérifié cette formule par un grand nombre d'observations.

196. De la polarisation produite par des réfractions successives. — La loi précédente nous apprend comment un faisceau de lumière naturelle peut être polarisé par des réfractions successives. En effet, puisqu'un faisceau naturel d'une intensité égale à 1 peut être considéré comme composé de deux faisceaux

Digitized by Google

d'une intensité égale à $\frac{1}{2}$ polarisés à angle droit, l'un ayant son plan de polarisation à 45° à droite du plan de réfraction, et l'autre à 45° à gauche, il est évident qu'après les deux réfractions au travers d'une lame parallèle de verre sous une incidence de 60° par exemple (Fig. 16), le faisceau émergent pourra être considéré comme composé de deux faisceaux polarisés à 50° 7', l'un à droite et l'autre à gauche du plan de réfraction. C'est ce faisceau ainsi modifié qui vient tomber sur la seconde lame; et, après sa seconde émergence, chacun de ses plans de polarisation aura encore tourné d'un certain angle dans le même sens; de même après une troisième émergence, etc., jusqu'à ce qu'enfin ses deux plans soient exactement opposés et coïncidents. A ce terme, il n'y a plus qu'un plan de polarisation, et le faisceau paraît complétement polarisé dans un plan perpendiculaire au plan de réfraction. Mais ici, comme dans la réflexion, il suffira que les plans opposés de polarisation fassent entre eux un angle assez petit pour que la polarisation complète paraisse sensiblement exacte à l'œil de l'observateur.

M. Brewster a trouvé, par exemple, que la lumière d'une bougie, à 10 ou 12 pieds de distance, est complétement polarisée :

par 8 plaques de verre ou 16 surfaces réfringentes sous une incidence de.................................. 78°52',

par 24.............. ou 48............ sous 61° »,

par 47.............. ou 94............ sous 43°34'.

La formule indique aussi que les plans de polarisation sont alors sensiblement perpendiculaires au plan de réfraction.

On trouve pareillement que cinq plaques de verre ou dix surfaces polarisent complétement un faisceau naturel qui les traverse sous la plus grande obliquité possible, etc.

Ces résultats expliquent d'une manière bien complète les phénomènes des piles de plaques.

197. De l'action mutuelle des rayons polarisés.— Pour compléter les lois générales de la lumière polarisée, il nous reste à faire connaître les phénomènes qui ont été découverts par MM. Arago et Fresnel sur l'action mutuelle des rayons polarisés. Je me fais un devoir de rapporter ici textuellement l'exposition de ces phénomènes telle qu'elle a été publiée par Fresnel :

« En étudiant les interférences des rayons polarisés, nous avons trouvé, M. Arago et moi, qu'ils n'exercent plus d'influence

les uns sur les autres quand leurs plans de polarisation sont perpendiculaires entre eux, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent plus alors produire de franges, quoique toutes les conditions nécessaires à leur apparition, dans le cas ordinaire, soient d'ailleurs scrupuleusement remplies. Je citerai les trois principales expériences qui nous ont servi à établir ce fait, en commençant par celle qui appartient à M. Arago. Elle consiste à faire traverser aux deux faisceaux émanant du même point lumineux et introduits par deux fentes parallèles, deux piles de lames transparentes très-minces, telles que celles de mica ou de verre soufflé, qu'on incline assez l'une et l'autre pour polariser complétement chacun des deux faisceaux, en ayant soin que les deux plans suivant lesquels on les incline soient perpendiculaires entre eux : alors on ne peut plus apercevoir de franges, quelque soin que l'on prenne d'ailleurs à compenser les différences de marche en faisant varier très-lentement l'inclinaison d'une des piles, tandis que, lorsque les plans d'incidence des piles ne sont plus perpendiculaires entre eux, on parvient toujours à faire paraître les franges; à mesure que ces plans s'éloignent du parallélisme, les franges s'affaiblissent, et elles disparaissent tout à fait quand ils sont rectangulaires, si la polarisation de deux faisceaux a été assez complète. Il résulte de cette expérience que les rayons polarisés suivant le même plan s'influencent mutuellement, comme des rayons de lumière non modifiée; mais que cette influence diminue à mesure que les plans de polarisation s'écartent l'un de l'autre, et devient nulle quand ils sont rectangulaires.

Voici une autre expérience qui conduit aux mêmes conséquences. On prend une lame de sulfate de chaux ou de cristal de roche parallèle à l'axe, et d'une épaisseur bien uniforme; on la coupe en deux, et l'on place chacune des moitiés sur une des fentes de l'écran. Je suppose qu'on ait tourné les deux moitiés de manière que les bords, qui étaient contigus dans la lame avant sa division, soient restés parallèles, les axes le seront aussi. Or, dans ce cas, on n'aperçoit qu'un seul groupe de franges, au milieu de l'espace éclairé, comme avant la division de la lame. Mais, si l'on fait tourner l'une de ses moitiés dans son plan, en dérangeant ainsi le parallélisme de leurs axes, on fait naître deux autres groupes de franges plus faibles, situés l'un à droite et l'autre à gauche du groupe du milieu, et qui en sont complétement séparés, dans la lumière blanche, lorsque les lames

de cristal de roche ou de sulfate de chaux dont on se sert ont seulement un millimètre d'épaisseur. Il est à remarquer que le nombre de largeur des franges comprises entre le milieu d'un de ces groupes et celui du groupe central est proportionnel à l'épaisseur des lames, pour des cristaux de même nature, ou dont la double réfraction a la même énergie, comme le cristal de roche et le sulfate de chaux. A mesure que l'angle des deux axes augmente, ces nouveaux groupes de franges deviennent de plus en plus prononcés, et atteignent enfin leur maximum d'intensité quand les axes des deux lames sont perpendiculaires entre eux; alors le groupe central, qui s'était affaibli graduellement, a tout à fait disparu, et est remplacé par une lumière uniforme. Il faut en conclure que les rayons qui les produiraient par leur interférence ne sont plus capables de s'influencer mutuellement. Il est aisé de voir, d'après la position de ces franges, qu'elles résultaient de l'interférence des rayons qui ont subi le même mode de réfraction dans les deux lames, puisque, les ayant parcourues avec des vitesses égales, ils doivent arriver simultanément dans le milieu de l'espace éclairé, qui répond à des chemins égaux, si d'ailleurs les deux lames sont de même épaisseur, et restent toujours l'une et l'autre perpendiculaires aux rayons, comme nous le supposons ici. Ainsi, les franges du groupe central étaient formées par la superposition de celles qui résultaient : 1° de l'interférence des rayons ordinaires de la lame de gauche avec les rayons ordinaires de la lame de droite; 2° de l'interférence des rayons extraordinaires de la première lame avec les rayons extraordinaires de la seconde. Les deux groupes excentriques, au contraire, résultent de l'interférence des rayons qui ont subi des réfractions différentes dans les deux lames; et, comme ce sont les rayons ordinaires qui marchent le plus vite dans le cristal de roche ou le sulfate de chaux, on voit que, si l'on emploie une de ces deux espèces de cristaux, le groupe de gauche doit être formé par la réunion des rayons extraordinaires de la lame de gauche avec les rayons ordinaires de la lame de droite, et le groupe de droite par la réunion des rayons extraordinaires de la lame de droite avec les rayons ordinaires de la lame de gauche. Cela posé, il s'agit de déterminer maintenant le sens de polarisation de chacun des faisceaux qui interfèrent, pour en conclure quelles sont les directions relatives des plans de polarisation qui favorisent ou em-

Digitized by Google

pêchent leur influence mutuelle. L'analogie indique que le mode de polarisation de la lumière doit être dans les lames minces le même que dans les cristaux assez épais pour la diviser en deux faisceaux distincts. Mais, comme cette hypothèse peut être l'objet d'une discussion, et contredit même une théorie ingénieuse d'un de nos plus célèbres physiciens, nous ne la présenterons pas d'abord comme un principe certain, et nous aurons recours à une expérience directe pour déterminer les plans de polarisation des rayons ordinaires et extraordinaires qui sortent de ces lames, auxquelles nous avons supposé un ou deux millimètres d'épaisseur. Cette épaisseur suffit pour qu'on puisse tailler un de leurs bords en biseau, et obtenir par cette forme prismatique la séparation des rayons ordinaires et extraordinaires; alors on reconnaît qu'ils sont effectivement polarisés, les premiers suivant la section principale et les autres dans un sens perpendiculaire. Si l'on ne regardait pas encore cela comme une preuve suffisante que tel est aussi leur mode de polarisation au sortir de chaque lame quand ses deux surfaces sont parallèles, on en trouverait une nouvelle démonstration dans les faits que nous venons de décrire, en partant des principes établis par l'expérience de M. Arago, et qui sont d'ailleurs confirmés par celle dont nous allons bientôt parler. Si, au contraire, on ne met plus en question le sens de polarisation des rayons ordinaires et extraordinaires, l'expérience actuelle devient une seconde démonstration de ces principes. En effet, lorsque les axes des deux lames étaient parallèles, les rayons qui avaient éprouvé les mêmes réfractions dans ces deux cristaux se trouvaient polarisés suivant la même direction, et ceux de noms contraires suivant des directions rectangulaires : voilà pourquoi le groupe des franges du milieu, qui provient de l'interférence des rayons de même nom, était à son maximum d'intensité, et les deux autres, qui résultent de l'interférence des rayons de noms contraires, ne paraissent pas encore. Mais, quand les axes des deux lames formaient entre eux un angle oblique, de 45° par exemple, les rayons de noms contraires et ceux du même nom pouvaient agir à la fois les uns sur les autres, puisque leurs plans de polarisation n'étaient plus rectangulaires, et les trois groupes de franges étaient produits. Lorsque enfin les axes deviennent perpendiculaires entre eux, les rayons de même nom se trouvent polarisés suivant des directions rectangulaires, et le groupe cen-

tral, auquel ils donnaient naissance, s'évanouit, tandis que les rayons ordinaires de la lame de gauche sont alors polarisés parallèlement au rayons extraordinaires de la lame de droite, ce qui fait que le groupe de droite qu'ils produisent atteint son maximun d'intensité. Il en est de même du groupe de gauche, résultant de l'interférence des rayons ordinaires de la lame de droite avec les rayons extraordinaires de la lame de gauche.

« Voici une troisième expérience qui confirme encore les conséquences que nous avons tirées de la première. Ayant fait polir un rhomboïde de spath calcaire sur deux faces opposées, dressées avec soin et bien parallèles, je le sciai perpendiculairement à ces faces, et j'obtins de cette manière deux rhomboïdes d'égale épaisseur, et dans lesquels la marche des rayons ordinaires et extraordinaires devait être exactement pareille sous la même incidence. Je les plaçai l'un devant l'autre, de manière que les rayons partis du point lumineux qui avaient traversé le premier rhomboïde parcourussent ensuite le second, en ayant soin que leurs faces fussent perpendiculaires à la direction des rayons incidents; de plus, la section principale du second rhomboïde était perpendiculaire à celle du premier, de sorte que les quatre faisceaux qu'ils produisent en général étaient réduits à deux; le faisceau ordinaire du premier rhomboïde était réfracté extraordinairement dans le second, et le faisceau extraordinaire de celui-là était réfracté ordinairement dans celui-ci. Il résultait de cette disposition que les différences de marche provenant de la différence de vitesse des rayons ordinaires et extraordinaires se trouvaient compensées pour les deux faisceaux sortants; ils se croisaient d'ailleurs sous un angle très-petit, et tel que les franges devaient avoir une largeur beaucoup plus que suffisante pour être aperçues, et cependant, quoique toutes les conditions nécessaires à la production des franges, pour les circonstances ordinaires, eussent été soigneusement observées, je ne pus jamais parvenir à les faire paraître. Pendant que je les cherchais avec soin, en tenant une loupe devant mon œil, je faisais varier lentement la direction d'un des rhomboïdes, en le déviant tantôt à droite, tantôt à gauche, afin de compenser l'effet résultant de quelque différence d'épaisseur, s'il s'en trouvait encore; mais, malgré ce tâtonnement réitéré un grand nombre de fois, je n'aperçus point de franges, et cela ne doit plus sur-

Digitized by

prendre, d'après ce que les autres expériences nous ont appris, puisque les deux faisceaux sortants se trouvaient polarisés à angle droit. Ce qui prouvait bien, d'ailleurs, que l'absence des franges ne tenait point à la difficulté d'arriver par le tâtonnement à une compensation exacte, c'est que je parvenais aisément à les faire paraître en employant de la lumière qui avait été polarisée avant son entrée dans les rhomboïdes, et en lui faisant éprouver une nouvelle polarisation après sa sortie.

« Il est donc complétement démontré, par les expériences que je viens de rapporter, que les rayons polarisés à l'angle droit ne peuvent exercer aucune influence sensible l'un sur l'autre, ou, en d'autres termes, que leur réunion produit toujours la même intensité de lumière, quelles que soient les différences de marche des deux systèmes d'ondes qui interfèrent.

« Un autre fait remarquable, c'est qu'une fois qu'ils ont été polarisés suivant des directions rectangulaires, il ne suffit plus qu'ils soient ramenés à un plan commun de polarisation pour qu'ils puissent donner des signes apparents de leur influence mutuelle. En effet, si dans l'expérience de M. Arago, ou dans celle que j'ai décrite ensuite, on fait passer les rayons sortis de deux fentes, qui sont polarisés à angle droit, au travers d'une pile de glaces inclinées, on n'aperçoit pas de franges dans quelque direction qu'on tourne son plan d'incidence. Au lieu d'une pile, on peut employer un rhomboïde de spath calcaire : si l'on incline sa section principale de 45° sur les plans de polarisation des faisceaux incidents, de manière qu'elle divise en deux parties égales l'angle qu'ils font entre eux, chaque image contiendra la moitié de chaque faisceau ; et ces deux moitiés, ayant le même plan de polarisation dans la même image, devraient y produire des franges, s'il suffisait de ramener les rayons à un plan commun de polarisation pour rétablir les effets apparents de leur influence mutuelle. Mais l'on ne peut jamais obtenir des franges par ce moyen, tant que les rayons n'ont pas été polarisés suivant un même plan, avant d'être divisés en deux faisceaux polarisés à l'angle droit.

« Lorsque la lumière a éprouvé cette polarisation préalable, au contraire, l'interposition du rhomboïde fait reparaître les franges. La direction la plus avantageuse à donner au plan primitif de polarisation est celle qui divise en deux parties égales l'angle des plans rectangulaires suivant lesquels les deux fais-

Digitized by Google

ceaux sont polarisés en second lieu, parce qu'alors la lumière incidente se partage également entre eux. Supposons, pour fixer les idées, que le plan de la polarisation primitive soit horizontal : il faudra que les plans de la polarisation suivante, imprimée à chacun des deux faisceaux, soient inclinés de 45° sur le plan horizontal, l'un en dessus, l'autre en dessous, de sorte qu'ils restent perpendiculaires entre eux. On peut obtenir cette polarisation rectangulaire, soit à l'aide des deux petites piles employées dans l'expérience de M. Arago, soit avec deux lames dont les axes sont disposés rectangulairement, soit enfin avec une seule lame cristallisée. Nous ne considérerons que ce dernier cas, les deux autres présentant des phénomènes absolument analogues.

« Pour diviser la lumière en deux faisceaux qui se croisent sous un petit angle et qui puissent ainsi faire naître des franges, l'appareil des deux miroirs est généralement préférable à l'écran percé de deux fentes, parce qu'il produit des franges plus brillantes; il a d'ailleurs ici l'avantage de donner immédiatement aux deux faisceaux la polarisation préalable nécessaire à notre expérience : il suffit pour cela que les deux miroirs soient de verre non étamé, et inclinés de 30° environ sur les rayons incidents; il faut avoir soin de les noircir par derrière pour détruire la seconde réflexion. On place près d'eux, dans le trajet des rayons réfléchis et perpendiculairement à leur direction, une lame de sulfate de chaux ou de cristal de roche, parallèle à l'axe, d'un ou deux millimètres d'épaisseur, en inclinant sa section principale de 45° sur le plan de la polarisation primitive, que nous avons supposé horizontal. L'appareil étant ainsi disposé, on ne verra qu'un seul groupe de franges au travers de la lame, comme avant son interposition, et il occupera la même position. Mais, si l'on met devant la loupe une pile de glaces inclinées dans un sens horizontal ou vertical, on découvrira de chaque côté du groupe central un autre groupe de franges, qui en sera d'autant plus éloigné que la lame cristallisée sera plus épaisse. Remplace-t-on la pile de glaces par un rhomboïde de spath calcaire, dont la section principale est dirigée horizontalement ou verticalement, l'on voit, dans chacune des deux images qu'il produit, les deux systèmes de franges additionnelles que l'interposition de la pile de glaces avait fait naître; et il est à remarquer que ces deux images sont complémentaires l'une de

l'autre, c'est-à-dire que les bandes obscures de l'une répondent aux bandes brillantes de l'autre.

« Nous voyons dans cette expérience une nouvelle confirmation des principes démontrés par les précédentes. Les rayons qui ont éprouvé des réfractions de noms contraires ne peuvent s'influencer, parce que, sortant de la même lame, dans le cas que nous considérons maintenant, ils se trouvent polarisés suivant les directions rectangulaires; en conséquence, les groupes de droite et de gauche ne peuvent exister, à moins qu'on ne rétablisse l'influence mutuelle de ces rayons en les ramenant à un plan commun de polarisation; c'est ce que fait l'interposition de la pile de glaces ou du rhomboïde. Les franges ainsi produites sont d'autant plus prononcées que les deux faisceaux de noms contraires qui concourent à leur formation sont plus égaux en intensité; et voilà pourquoi la direction de la section principale du rhomboïde qui fait un angle de 45° avec l'axe de la lame, est la plus favorable à l'apparition des franges. Quand la section principale du rhomboïde est parallèle ou perpendiculaire à celle de la lame, les rayons réfractés ordinairement par la lame passent en entier dans une image au lieu de se partager entre les deux, et tous les rayons extraordinaires passent dans l'autre image, en sorte qu'il ne peut plus y avoir interférence entre eux; et les groupes additionnels disparaissent : chaque image ne présente plus que les franges qui résultent de l'interférence des rayons de même nom, c'est-à-dire celles qui composent le groupe central.

« Ces deux groupes de franges additionnelles que présentait la lumière polarisée dans la première position du rhomboïde, fournissent un des moyens les plus précis de mesurer la double réfraction et d'en étudier la loi. En effet, leur position excentrique tient à la différence de marche des rayons ordinaires et extraordinaires qui sont sortis de la lame, et l'on peut juger du nombre d'ondulations dont les rayons extraordinaires du faisceau de droite sont restés en arrière des rayons ordinaires de gauche par le nombre de largeurs de franges comprises entre le milieu du groupe de droite et celui du groupe central. On détermine encore mieux cette différence de marche, en mesurant l'intervalle compris entre les milieux des deux groupes extrêmes, qui est le double de leur distance au milieu du groupe central. C'est la lumière blanche qu'il est le plus commode d'employer

dans ces sortes d'observations : d'abord, parce qu'elle est plus vive, et, en second lieu, parce qu'elle rend la bande centrale de chaque groupe plus facile à reconnaître. Comparant ensuite l'épaisseur de la lame à la différence de marche observée, on en conclut le rapport des vitesses des rayons ordinaires et extraordinaires. »

CHAPITRE III.

Couleurs de la lumière polarisée.

198. Teintes colorées des lames parallèles à l'axe. — Un faisceau de lumière blanche polarisée se colore des plus vives nuances toutes les fois qu'il traverse, *sous certaines conditions*, une lame de substance biréfringente taillée parallèlement à l'axe.

Pour étudier ces phénomènes de coloration qui sont si remarquables, nous emploierons de préférence l'appareil de M. Noremberg (Pl. 43, Fig. 17) : la lumière des nuées ou celle d'une lampe est reçue sur la glace non étamée *g*, où elle se polarise; réfléchie vers le miroir *m*, elle est renvoyée par celui-ci pour se propager en suivant l'axe de l'appareil après avoir traversé la première glace *g* elle-même. Ce faisceau polarisé est ensuite observé avec un analyseur quelconque, ou avec un verre noir fixe *b* n° 1 incliné sous l'angle de polarisation, ou avec l'analyseur *c* n° 2 de M. Delezenne (qui ressemble au précédent, mais qui ramène le rayon dans l'axe par une réflexion totale), ou avec un prisme de Nicol *d* n° 3, ou avec un prisme biréfringent achromatisé *e* n° 4, ou enfin avec une pile de glaces, une tourmaline, etc. Toutes ces pièces ont une monture qui s'adapte dans l'anneau *s*, où elles peuvent tourner, et chacune d'elles porte un repère qui marque sa position sur la circonférence divisée de cet anneau. En *t* se trouve un autre anneau pareillement divisé, sur lequel s'adapte la monture d'un verre parallèle *v*, qui peut s'incliner à volonté sur le rayon polarisé ou lui être perpendiculaire; c'est sur le support *v* que l'on dispose des lames que l'on veut soumettre à l'expérience : dans quelques cas, cependant, il est nécessaire de les mettre directement sur le miroir *m*.

Voici maintenant les phénomènes que l'on observe, en prenant pour analyseur le prisme biréfringent, et en mettant sur le support une lame de cristal de roche *f* n° 5, dont les deux

faces soient parallèles entre elles et parallèles à l'axe, et dont l'épaisseur ne dépasse pas 0,45 de millimètre.

1° La section principale du prisme étant fixée dans le plan primitif de polarisation, pendant que la lame tourne sur son support, en restant perpendiculaire au rayon polarisé, on ne voit qu'une seule image blanche dans quatre positions : image ordinaire quand la section principale de la lame coïncide avec celle du prisme, image extraordinaire quand elle lui devient perpendiculaire; dans toutes les autres positions, il y a deux images, dont les couleurs sont toujours exactement complémentaires, car elles donnent du blanc parfait dans la portion où elles se superposent (Pl. 44, Fig. 1), et chacune passe tour à tour par la série des nuances prismatiques; ces deux images prennent à la fois leur plus vif éclat de coloration quand la section principale de la lame fait avec celle du prisme des angles de $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{2}$ ou $\frac{7}{2}$ quadrans.

2° Si la section principale du prisme est perpendiculaire au plan primitif de polarisation, on observe des phénomènes analogues : seulement, l'image ordinaire prend la place de l'image extraordinaire, et *vice versa*.

3° Quand la section principale du prisme n'est ni parallèle ni perpendiculaire au plan de polarisation primitive, on observe encore les mêmes phénomènes, savoir : une image nulle et l'autre blanche, quand les deux sections principales du prisme et de la lame sont parallèles ou perpendiculaires entre elles; maximum d'éclat dans les couleurs, quand les sections font un angle mesuré par un nombre impair de demi-quadrans; et toujours les mêmes nuances, plus ou moins affaiblies, dans toutes les positions intermédiaires.

Les lames de cristal de roche de plus d'un demi-millimètre d'épaisseur donnent des teintes de plus en plus affaiblies; mais toutes les lames plus ou moins minces donnent des nuances différentes, et qui sont, en général, d'autant plus vives que l'épaisseur est moindre. En étudiant les franges diffractées et les anneaux colorés, nous avons vu qu'il y a, pour chaque couleur simple, des franges ou des anneaux du premier ordre, du second ordre, etc., auxquels correspondent dans la lumière blanche des teintes composées différentes; ce qui donne des rouges de différents ordres, des orangés de différents ordres, etc. Or, en étudiant les teintes des lames cristallisées, de même substance et

Digitized by Google

d'épaisseur variable, M. Biot a reconnu que ces mêmes périodes se reproduisent, c'est-à-dire, qu'en graduant convenablement les épaisseurs, on peut former une série de lames qui donnent, par exemple, la première, le rouge du premier ordre; la deuxième, le rouge du deuxième ordre; la troisième, le rouge du troisième ordre, etc.; et, en comparant ces épaisseurs diverses, M. Biot s'est assuré qu'elles suivent la série des nombres naturels 1, 2, 3, 4, etc. Au moyen de cette loi simple et remarquable, il suffit donc de connaître à quelle épaisseur absolue se forme, dans une substance cristalline, une teinte bien définie, pour assigner quelle teinte sera produite par une autre épaisseur quelconque, ou quelle épaisseur il faudrait pour produire telle autre teinte donnée.

Les cristaux à un axe peuvent à cet égard offrir de très-grandes différences, car M. Biot trouve, par exemple, qu'une lame de chaux carbonatée parallèle à l'axe devrait être 18 fois plus mince qu'une lame de cristal de roche, aussi parallèle à l'axe, pour donner la même teinte. C'est pourquoi il est à peu près impossible d'étudier ces phénomènes dans la chaux carbonatée.

199. Théorie de Fresnel sur les couleurs des lames cristallisées. — Soient pp' le plan primitif de polarisation du faisceau incident (Pl. 43, Fig. 18), rr' la section principale de la lame cristallisée qu'il traverse, a l'angle pcr, dd' une perpendiculaire à rr', ll' la section principale du prisme biréfringent, b l'angle lcp, et mm' une perpendiculaire à ll'. Essayons de déterminer et les images qui seront produites et leur intensité relative, et l'action mutuelle que les faisceaux ordinaires et extraordinaires exerceront les uns sur les autres.

Représentons par 1 l'intensité du rayon polarisé à l'instant où il tombe sur la lame cristallisée.

En traversant la lame, le faisceau se décompose en deux autres, l'un ordinaire et l'autre extraordinaire, qui ont pour intensité,

Le premier, $\cos^2 a = f_o$ polarisé suivant cr;
Le second, $\sin^2 a = f_e$ polarisé suivant cd;

mais la lame est beaucoup trop mince pour qu'il y ait entre eux une séparation sensible.

En traversant le rhomboïde, chacun de ces faisceaux élémentaires se décompose encore en deux autres :

Digitized by Google

$\cos^2 a$ donne $\begin{cases} \cos^2 a \cos^2 (a-b) = f_{o+o'} \text{ polarisé suivant } cl. \\ \cos^2 a \sin^2 (a-b) = f_{o+e'} \text{ polarisé suivant } cm. \end{cases}$

$\sin^2 a$ donne $\begin{cases} \sin^2 a \sin^2 (a-b) = f_{e+o'} \text{ polarisé suivant } cl. \\ \sin^2 a \cos^2 (a-b) = f_{e+e'} \text{ polarisé suivant } cm. \end{cases}$

Les deux portions polarisées suivant cl prennent la même direction pour arriver à l'œil, et composent l'image ordinaire; il en est de même des deux portions polarisées suivant cm et cm', qui composent l'image extraordinaire. Il en résulte donc les éléments suivants :

pour l'image ordinaire. . . . $\begin{cases} \cos^2 a \cos^2 (a-b) = f_{o+o'} \\ \sin^2 a \sin^2 (a-b) = f_{e+o'} \end{cases}$

pour l'image extraordinaire.. $\begin{cases} \cos^2 a \sin^2 (a-b) = f_{o+e'} \\ \sin^2 a \cos^2 (a-b) = f_{e+e'} \end{cases}$

On croirait d'abord que les éléments de chacune de ces images doivent simplement s'ajouter entre eux pour composer, en définitive, soit l'image ordinaire, soit l'image extraordinaire : mais il faut prendre garde que les deux éléments de chaque image n'ont pas la même vitesse. En effet, dans l'image ordinaire, par exemple, le faisceau $f_{o+o'}$ a subi la réfraction ordinaire dans la lame et dans le rhomboïde, tandis que le faisceau $f_{e+o'}$ a subi la réfraction extraordinaire dans la lame et la réfraction ordinaire dans le rhomboïde. Les vitesses ordinaire et extraordinaire étant différentes, il en résulte donc une avance ou un retard de l'un des faisceaux élémentaires sur l'autre, et par conséquent une concordance ou une discordance de vibrations qui peuvent être plus ou moins complètes, comme si ces faisceaux avaient en réalité parcouru des chemins plus ou moins inégaux.

Soit e le chemin parcouru par le 1^er faisceau $f_{o+o'}$,

soit e' le chemin parcouru par le 2^e faisceau $f_{e+o'}$;

$e-e'$ sera la différence des chemins parcourus; et, dans ce cas, Fresnel a démontré le premier (voy. chap. V, propos. V) que l'intensité totale, au lieu d'être représentée par la somme des faisceaux composants ou par la somme des carrés de leur vitesse, se trouve représentée par cette somme, *plus le double produit de ces vitesses multiplié par* $\cos 2\pi \frac{c}{d}$;

π est la demi-circonférence dont le rayon est 1,

c est la différence des chemins parcourus, qui est ici $e-e'$,

d est la longueur d'une ondulation pour l'espèce de lumière que l'on considère.

Il est facile de voir, d'après cela, que l'intensité devient enfin pour l'image ordinaire :

$$\cos^2 b - \sin 2a \,.\, \sin 2(a-b) \,.\, \sin^2 \pi \,.\, \left(\frac{e-e'}{d}\right).$$

L'intensité de l'image extraordinaire se trouve par les mêmes principes : seulement, Fresnel a démontré qu'à la différence des chemins parcourus par les deux faisceaux composants *il faut ajouter une demi-ondulation* quand *leurs plans de polarisation continuent à s'éloigner l'un de l'autre (considérés d'un seul côté de leur commune intersection) jusqu'à ce qu'ils se soient placés sur le prolongement l'un de l'autre* (voy. chap. v, propos. III). Or, les deux faisceaux f_{o+e} et $f_{e+e'}$ qui constituent l'image extraordinaire sont polarisés, l'un suivant cm, l'autre suivant cm' prolongement de cm; il faut donc, à la différence $e-e'$ des chemins qu'ils ont parcourus dans la lame, ajouter une demi-ondulation qui se trouve encore perdue par le renversement du plan de polarisation. Par conséquent, à la somme des intensités, ou à la somme des carrés des vitesses, il faut ajouter le produit de ces vitesses multiplié par

$$\cos 2\pi \left(\frac{e-e'}{d} + \frac{1}{2}\right) = -\cos 2\pi \left(\frac{e-e'}{d}\right);$$

ce qui donne, pour l'intensité de l'image extraordinaire,

$$\cos^2 a \sin^2 (a+b) + \sin^2 a \cos^2 (a-b)$$
$$-2 \cos a \sin (a-b) \,.\, \sin a \cos (a-b) \,.\, \cos 2\pi \left(\frac{e-e'}{d}\right),$$

ou,

$$[\sin a \cos (a-b) - \sin (a-b) \cos a^2]$$
$$+ 2 \sin a \cos (a-b) \sin (a-b) \cos a$$
$$-2 \cos a \sin (a-b) \sin a \cos (a-b) \cos 2\pi \left(\frac{e-e'}{d}\right),$$

ou enfin,

$$\sin^2 b + \sin 2a \sin 2(a-b) \sin^2 \pi \left(\frac{e-e'}{d}\right).$$

Telles sont, dit Fresnel, les formules générales qui donnent l'intensité de chaque espèce de lumière homogène dans les images ordinaire et extraordinaire en fonctions de la longueur d'ondu-

lation et de la différence des chemins parcourus $e - e'$ par les rayons qui ont traversé la lame cristallisée. Connaissant son épaisseur et les vitesses des rayons ordinaires et des rayons extraordinaires dans le cristal, il sera facile de déterminer $e - e'$. Dans le cristal de roche et dans la plupart des cristaux doués de la double réfraction, $e - e'$ n'éprouve que de très-légères variations en raison de la différence de nature des rayons lumineux; en sorte qu'on peut le regarder comme une quantité constante pour tous les cristaux où la *dispersion de double réfraction* est très-petite relativement à la double réfraction. Si, après avoir calculé la différence de marche $e - e'$, on la divise successivement par la longueur moyenne d'ondulation de chacune des sept principales espèces de rayons colorés, et si l'on substitue successivement ces différents quotients dans les expressions ci-dessus, on aura les intensités de chaque espèce de rayons colorés dans les images ordinaire et extraordinaire, et l'on pourra déterminer alors les teintes de ces images par la formule empirique que Newton a donnée pour trouver la couleur résultant d'un mélange quelconque de rayons divers dont on connaît les intensités relatives. C'est pourquoi l'on doit considérer les formules générales qui donnent l'intensité de chaque espèce de lumière homogène en fonction de sa longueur d'ondulation comme l'expression même de la teinte produite par la lumière blanche.

Revenons maintenant aux formules générales, pour les discuter dans quelques cas particuliers :

Image ordinaire :

$$\cos^2 b - \sin 2a \sin 2(a-b) \sin^2 \pi\left(\frac{e-e'}{d}\right);$$

image extraordinaire :

$$\sin^2 b + \sin 2a \sin 2(a-b) \sin^2 \pi\left(\frac{e-e'}{d}\right).$$

1° La somme des intensités des deux faisceaux reproduit l'intensité primitive qui a été prise pour unité.

2° Sous l'incidence perpendiculaire, que nous considérerons ici, la différence des chemins parcourus est, dans tous les cristaux, proportionnelle à l'épaisseur, et, dans chaque cristal, elle dépend en outre de la différence des vitesses du rayon ordinaire et du rayon extraordinaire, ou des indices de réfraction correspondant à ces deux espèces de rayons. Dans un cristal où les

Digitized by Google

indices seraient presque égaux, il faudrait une grande épaisseur pour obtenir, par exemple, le rouge du premier ordre, tandis que, pour obtenir la même nuance, il ne faudrait qu'une épaisseur très-petite si les indices ordinaire et extraordinaire étaient fort différents.

3° Quand la différence des chemins parcourus est égale à un très-grand nombre d'ondulations, les images sont blanches, comme dans la théorie des lames minces, et par la même raison. Ces cas exceptés, les images peuvent encore être blanches pour d'autres raisons que nous allons examiner.

4° La condition nécessaire pour qu'il n'y ait pas de couleur dans les images est évidemment que le terme qui varie avec la longueur des ondulations soit nul, puisque alors les rayons de toutes les couleurs auront des intensités égales et produiront du blanc. La condition de la blancheur des images est donc exprimée par

$$\sin 2a \sin 2(a-b) = 0;$$

et elle ne peut être remplie que par

$$a = 0; \quad a = 1^q; \quad a = 2^q; \quad a = 3^q;$$

ou par

$$b = a; \quad b = 1^q + a; \quad b = 2^q + a; \quad b = 3^q + a.$$

Ainsi, les images sont toujours blanches : premièrement, quand la section principale de la lame est parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation; secondement, quand la section principale de la lame est parallèle ou perpendiculaire à la section principale du rhomboïde. C'est ce qu'il est facile de voir *a priori*, puisque, dans le premier cas, le faisceau n'éprouve qu'une seule réfraction en traversant la lame, et que, dans le second cas, il n'éprouve qu'une seule réfraction en traversant le rhomboïde.

5° La condition nécessaire pour que les images soient colorées des plus vives nuances est évidemment que le terme qui varie avec les longueurs d'ondulation atteigne son *maximum*, et cela arrive quand son coefficient est égal à l'unité, ou quand on a :

$$\sin 2a \sin 2(a-b) = 1.$$

Cette condition est remplie par

$$a = 45°, \text{ et } b = 0° \text{ ou } 90°.$$

Ce qui donne :

image ordinaire, $\cos^2 \pi \left(\frac{e-e'}{d}\right)$,

image extraordinaire, $\sin^2 \pi \left(\frac{e-e'}{d}\right)$.

Ainsi les plus vives couleurs s'observent quand l'axe de la lame fait un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation, et quand en même temps la section principale du rhomboïde est parallèle ou perpendiculaire à ce plan. C'est, en effet, ce qui est confirmé par l'expérience.

6° Le *plan définitif* de polarisation peut être aisément déterminé d'une manière générale dans l'une et l'autre image.

Si la différence des chemins parcourus est égale à 0° ou à un nombre pair de demi-ondulations, on a :

$$e - e' = \frac{2nd}{2}, \quad \text{ou} \quad \frac{e-e'}{d} = n.$$

n pouvant recevoir toutes les valeurs entières, 0, 1, 2, etc., on a :

$$\sin^2 \pi \left(\frac{e-e'}{d}\right) = \sin^2 n\pi = 0.$$

Ainsi, pour $b = 0$, l'image extraordinaire s'évanouit, tandis que l'image ordinaire devient égale à 1, et celle-ci est alors à son émergence polarisée complétement dans le plan primitif de polarisation.

Si la différence des chemins parcourus est égale à un nombre impair de demi-ondulations, on a :

$$e - e' = (2n+1)\frac{d}{2},$$

ou

$$\frac{e-e'}{d} = \frac{2n+1}{2},$$

et

$$\sin^2 \pi \left(\frac{e-e'}{d}\right) = \sin^2 \pi \left(\frac{2n+1}{2}\right) = 1.$$

Ainsi, pour $b = 2a$, l'image extraordinaire disparaît encore, tandis que l'image ordinaire devient égale à 1, et celle-ci se trouve alors à son émergence complétement polarisée dans l'azimut $2a$ ou dans la section principale du rhomboïde.

Si la différence des chemins parcourus n'est ni un nombre pair ni un nombre impair de demi-ondulations, il n'y a plus

Digitized by Google

d'image qui puisse disparaître, et les faisceaux émergents sont alors polarisés dans diffréents sens.

Tous ces résultats des formules sont en effet conformes à l'expérience.

Ces notions sont suffisantes pour faire comprendre les principes à la fois simples et féconds sur lesquels Fresnel a fondé sa belle théorie des couleurs des lames cristallisées. Nous n'entreprendrons pas d'appliquer ces mêmes principes aux cas beaucoup plus compliqués que nous devons encore examiner; mais il est important de décrire la véritable cause de ces phénomènes, et de faire voir que l'inégale vitesse des rayons ordinaire et extraordinaire détermine des avances on des retards entre les diverses ondulations, et par conséquent des interférences qui développent les couleurs.

C'est pour plus de simplicité que nous avons supposé le cristal à un axe, car, dans les cristaux à deux axes, les phénomènes se passent de la même manière; seulement, la ligne rr' (Fig. 18) doit être alors l'*axe principal*, c'est-à-dire la ligne qui partage en deux parties égales l'angle aigu des deux axes; et la ligne dd' doit être l'*axe secondaire*, ou la ligne qui partage leur angle obtus. La ligne perpendiculaire à l'axe principal et à l'axe secondaire se nomme aussi l'*axe tertiaire;* nous aurons à en tenir compte un peu plus loin. Nous ferons remarquer seulement ici que la chaux sulfatée, qui a ses deux axes dans le plan des lames, qui se divise si facilement en minces feuillets, et donne d'éclatantes couleurs, est l'un des cristaux les plus commodes pour étudier les phénomènes dont il s'agit.

Nous ajouterons que, pour observer ces phénomènes avec la lumière solaire, en projetant les images sur un tableau, il suffit d'adapter au volet de la chambre noire l'appareil représenté (Pl. 43, Fig. 21), qui ressemble au microscope solaire, car il se compose, comme lui, d'une glace réfléchissante a, d'une lentille b, de 22 centimètres de foyer, et aussi quelquefois d'une troisième lentille c, d'un foyer beaucoup plus court. La lumière est en général suffisamment polarisée par la réflexion sur la glace a; la lame montée sur un diaphragme la reçoit avant son incidence sur la lentille b; et la lentille c, mise à une distance à peu près égale à la somme des distances focales principales de b et de c, projette l'image sur un tableau; il suffit alors de mettre en d un prisme biréfringent et de le tourner convenablement

Digitized by Google

pour observer sur le tableau tous les phénomènes que nous avons décrits.

L'appareil photo-électrique (Pl. 36, Fig. 1) peut encore ici suppléer à la lumière solaire; seulement, il faut, à la suite de la première lentille, introduire un large prisme polarisant.

200. Anneaux colorés dans les cristaux à un axe. — Lorsqu'on place entre deux tourmalines une plaque de spath d'Islande, perpendiculaire à l'axe, ayant de 1 à 20 ou 30 millimètres d'épaisseur, et qu'on la regarde contre le ciel en plaçant l'œil derrière la seconde tourmaline, on observe les brillants phénomènes représentés (Pl. 44, Fig. 2, 3, 4). Si les tourmalines sont croisées, on voit la croix noire (Fig. 2) et une belle série d'anneaux vivement colorés : si les tourmalines sont parallèles, on voit la croix blanche (Fig. 4) et des anneaux complémentaires des précédents; enfin, si les tourmalines sont seulement obliques, on voit (Fig. 3) la croix noire qui s'altère, les anneaux qui se déplacent, et le renversement qui s'accomplit peu à peu pour passer de la figure 2 à la figure 4 ou *vice versa*, suivant que l'on passe du croisement au parallélisme, ou du parallélisme au croisement. Quant à la position de la plaque elle-même, elle est tout à fait indifférente; sa rotation ne modifie en aucune sorte les phénomènes, à moins qu'elle n'offre des points d'une cristallisation irrégulière.

Lorsqu'on éclaire les tourmalines avec les diverses couleurs du spectre, ou lorsqu'on place devant l'œil des verres qui ne laissent passer que le rouge, toutes les autres couleurs disparaissent, comme on devait s'y attendre, et l'on n'aperçoit plus alors qu'une série d'anneaux alternativement noirs et colorés de la lumière simple incidente, puis une croix noire dans le cas du croisement des tourmalines, et une croix colorée de la même manière dans leur parallélisme. Les diamètres des anneaux croissent avec la réfrangibilité de la lumière qui les produit. La grandeur absolue des anneaux diminue à mesure que la plaque augmente d'épaisseur; ils finissent par disparaître quand la plaque est trop épaisse : cependant, quand on cesse de les apercevoir à la lumière blanche, on peut encore les découvrir à la lampe monochromatique, c'est-à-dire à la flamme jaune paille de l'alcool salé; seulement, ils sont alors petits et très-serrés.

On observe des phénomènes analogues dans tous les cristaux

Digitized by Google

à un axe, comme le cristal de roche, la tourmaline, le zircon, le nitrate de soude, le mica, l'hyposulfate de chaux, l'apophyllite, etc., etc.; cependant nous devons remarquer que le spath d'Islande est peut-être, de tous les cristaux, celui qui donne les apparences les plus régulières et les plus simples. Dans le cristal de roche, par exemple (Pl. 44, Fig. 5), la croix disparaît par l'effet de la *polarisation rotatoire*, dont nous parlerons plus loin; dans d'autres cristaux à un axe, comme l'apophyllite, l'arrangement des couleurs est altéré, parce qu'il arrive sans doute que l'axe optique des différentes couleurs n'est pas rigoureusement dans la même direction.

Dans les cas les plus simples, le phénomène des anneaux se rattache assez facilement à la théorie précédente de Fresnel; mais, lorsqu'il s'agit de discuter le cas général, les calculs se compliquent beaucoup trop pour qu'il nous soit permis de les exposer ici; d'ailleurs, on n'a pas fait assez d'expériences sur les mesures exactes des anneaux dans les différentes couleurs pour vérifier la théorie dans toutes les applications. Nous devons donc nous borner à indiquer d'une manière générale l'action qui se développe dans les cristaux perpendiculaires à l'axe qui donnent ainsi naissance aux couleurs.

Soient *pp'* (Pl. 43, Fig. 19) la plaque perpendiculaire à l'axe, et *o* la position de l'œil. La partie du faisceau incident qui devient visible forme une espèce de cône lumineux *bob'* dont le sommet *o* est dans l'œil, dont la base circulaire a un diamètre *bb'* variable avec la distance, et dont l'axe *co* coïncide avec l'axe du cristal. Les divers rayons de ce cône éprouvent des effets bien différents : ceux qui avoisinent l'axe *co* traversent la plaque sans se dévier, et ceux qui se trouvent près des bords *abo* la traversent obliquement, et sont par conséquent soumis aux deux réfractions ordinaire et extraordinaire; mais ces deux réfractions s'accomplissent toujours dans le même plan, parce que toute section perpendiculaire passant par *co* est une *section principale;* de plus, les divers rayons, également éloignés de l'axe ou répartis sur une même circonférence, éprouvent des modifications bien différentes dans leurs plans de polarisation; car, si l'on représente par *dbd'b'* (Fig. 20) la coupe du faisceau au moment où il sort de la plaque cristallisée, et par *bb'* le plan primitif de polarisation, il est évident : 1° que les rayons *b* et *b'* restent polarisés dans le plan primitif, puisque leur plan de polarisation

coïncide avec la section principale bb', qu'ils traversent; 2° que les rayons d et d' restent pareillement polarisés dans leur plan primitif, parce que leur plan de polarisation est perpendiculaire à la section dd', qu'ils traversent; 3° que les rayons tels que f se séparent en deux autres : l'un ordinaire, polarisé suivant fh; l'autre extraordinaire, polarisé suivant fk. Or, ces derniers rayons, en se séparant ainsi, prennent nécessairement des vitesses différentes : l'ordinaire prend de l'avance sur l'extraordinaire, ou *vice versa*, suivant que le cristal est positif ou négatif; et, en s'éloignant progressivement de l'axe c, on voit que cette avance devient successivement égale à un nombre pair ou à un nombre impair de demi-ondulations. Cependant ces rayons étant polarisés à angle droit ne peuvent pas interférer; c'est pour cela que le faisceau émergent reste d'une teinte uniforme lorsqu'il se propage librement; mais si l'on va le regarder avec un analyseur, par exemple, avec une tourmaline dont l'axe soit parallèle au plan primitif de polarisation, on observe des phénomènes bien différents : 1° les bandes bb' et dd' polarisées dans la section principale de la tourmaline sont absorbées, ce qui donne la croix noire; 2° a étant l'azimut de la section cfh, les intensités des rayons polarisés suivant fh et suivant fk sont $r = t \cos^2 a$ et $x = t \sin^2 a$, t étant l'intensité du faisceau incident, la tourmaline agissant sur le premier donne deux faisceaux,

$$r' = r \cos^2 a = t \cos^4 a \quad \text{et} \quad x' = r \sin^2 a = t \cos^2 a \sin^2 a;$$

agissant sur le second elle donne pareillement deux rayons

$$r'_1 = x \sin^2 a = t \sin^4 a, \quad x'_1 = x \cos^2 a = t \cos^2 a \sin^2 a.$$

De ces quatre rayons les deux ordinaires r' et r'_1 sont absorbés, et les deux extraordinaires x' et x'_1 d'égale intensité, passent au travers de la tourmaline, et peuvent maintenant interférer, puisqu'ils sont ramenés au même plan de polarisation : seulement il y a entre eux une demi-longueur d'onde (chap. v, propos. III); d'ailleurs x' provient de celui qui a traversé la plaque avec la vitesse ordinaire, x'_1 de celui qui l'a traversée avec la vitesse extraordinaire. La différence des chemins parcourus en vertu de ces vitesses différentes doit donc être augmentée d'une demi-longueur d'onde. Ainsi, la série des anneaux sombres correspond aux différences de marche 0, $\frac{2d}{2}$, $\frac{4d}{2}$, etc., dans le cristal; et la série des anneaux brillants aux différences de marche $\frac{d}{2}$, $\frac{3d}{2}$, etc.

Digitized by Google

Ces indications suffisent pour faire comprendre la cause du phénomène et les conditions principales sous lesquelles il s'accomplit.

On voit maintenant combien il est facile de varier les expériences, soit avec la lumière ordinaire en recevant les anneaux dans l'œil, soit avec la lumière solaire en les projetant sur un tableau. Dans le premier cas, s'il ne s'agit pas de prendre des mesures, on emploie la pince à tourmaline (Pl. 43, Fig. 22); s'il s'agit de prendre des mesures, on peut employer avec avantage l'appareil de M. Soleil (Pl. 43, Fig. 24). La lumière polarisée par la glace *a* est concentrée par une lentille *b* sur la lame *l*; deux autres lentilles *c* et *d* servent d'oculaire, et on regarde avec la tourmaline *t*; les trois lentilles *b*, *c* et *d* ont la même distance focale de 3 centimètres; l'intervalle des deux dernières est un peu moindre que la somme de leurs distances focales, et la lame est à la fois au foyer de *b* et de *c*. Ainsi, *d* est une loupe avec laquelle on regarde l'image réelle des anneaux, formée au foyer de *c* : un micromètre, convenablement placé entre les deux dernières lentilles, peut donner des mesures assez exactes. La pince *p*, qui porte le cristal, a un mouvement de rotation sur un cercle divisé qui sert à mesurer l'angle des axes dans les cristaux à deux axes, comme nous le verrons bientôt.

Pour faire ces expériences au moyen de la lumière solaire, on emploie l'appareil de la figure 21 : la lame soumise à l'expérience et la tourmaline qui doit redresser les plans de polarisation se placent alors, l'une et l'autre, près du foyer commun des lentilles *b* et *c*, et les anneaux vont se projeter, comme les images du microscope solaire, sur un tableau convenablement disposé.

201. Anneaux colorés dans les cristaux à deux axes. — Lorsque, entre la pince à deux tourmalines, on met une lame de nitrate de potasse, taillée perpendiculairement à l'axe de cristallisation, l'on observe les phénomènes représentés (Pl. 44, Fig. 7, 8, 9) : on obtient la figure 7 quand les axes des tourmalines sont croisés, le cristal ayant lui-même une position convenable; puis, en tournant peu à peu le cristal sans déranger les tourmalines, on obtient successivement la figure 8 pour arriver enfin à la figure 9 quand le cristal a décrit un arc de 45° et à la figure 7 horizontale quand il a fait un quadran.

M. Herschel, qui a étudié ces phénomènes avec autant de

Digitized by Google

sagacité que de précision, a fait voir que, dans les cristaux à deux axes, les couleurs sont distribuées sur des *lemniscates*, c'est-à-dire sur des courbes à deux centres (Pl. 43, Fig. 23), jouissant de cette propriété que, pour chacune, le produit des rayons vecteurs *cm* et *c'm* est constant et égal au produit de la demi-distance des centres par un coefficient connu qui varie d'une courbe à l'autre.

Ici, le double système d'anneaux est évidemment produit par les deux axes du cristal, et le centre de chaque système indique le prolongement de l'axe, autour duquel il se produit.

En faisant l'expérience à la lampe monochromatique, on peut compter beaucoup plus de courbes autour de chaque centre.

L'appareil (Pl. 43, Fig. 24) peut servir à trouver l'angle des deux axes : il suffit pour cela de mettre un fil croisé au foyer de la lentille *d*, de disposer le cristal pour que les deux centres des anneaux soient dans un plan vertical, et de faire tourner la pince *p* pour amener successivement chaque centre sur la croix des fils ; l'arc décrit par la pince est l'angle des axes.

Le carbonate de plomb donne à peu près les mêmes apparences que le nitrate de potasse : ses lemniscates et ses couleurs sont représentées (Pl. 44, Fig. 10); l'angle de ses axes est de 17° 30′. Lorsque l'angle des axes est plus grand que 20 ou 25°, on ne peut plus voir simultanément les deux systèmes d'anneaux dans le champ de l'instrument, ni même dans la pince à tourmaline ; le système unique, qui est visible, se présente alors sous la forme dessinée dans la figure 6 : la barre noire tourne en sens inverse du cristal, et décrit 90° pendant qu'il en décrit 90, en sorte qu'un quart de révolution suffit pour la faire passer de la position horizontale à la position verticale, et *vice versa*, ou plutôt du plan qui contient à la fois le plan de polarisation et l'axe de la tourmaline dans le plan qui lui est perpendiculaire. Dans l'une ou dans l'autre de ces positions, le second centre se trouve sur la barre noire, et c'est là qu'il faut le chercher en faisant tourner la pince ; mais, comme celle-ci ne tourne qu'autour d'un axe horizontal, il faut toujours mettre la barre verticale pour déterminer l'angle des axes.

On peut aussi, au moyen du même appareil, constater que, dans presque tous les cristaux à deux axes, les diverses couleurs simples ont des axes différents : dans le carbonate de plomb, par exemple, les systèmes d'axes de toutes les couleurs sont

Digitized by Google

dans le même plan; et leur angle décroît depuis le rouge jusqu'au violet; dans le nitrate de potasse, au contraire, les axes, contenus encore dans le même plan, font entre eux des angles qui croissent avec la réfrangibilité; enfin dans certains cristaux, comme le borax, les systèmes d'axes des diverses couleurs sont dans des plans différents. On comprend que ces propriétés singulières des différents cristaux doivent apporter des modifications considérables dans l'arrangement des couleurs, et une trop grande complication dans l'analyse théorique de tous ces phénomènes, pour qu'il soit possible de l'aborder ici.

Les brillantes couleurs qui se développent, comme nous venons de le dire, dans les cristaux à deux axes peuvent s'obtenir aussi avec la lumière solaire, comme nous l'avons indiqué tout à l'heure pour les cristaux à un axe.

202. Franges hyperboliques ou parallèles produites par les cristaux. — Lorsqu'on présente à un rayon polarisé une lame de cristal de roche dont l'une des faces soit parallèle à l'axe et l'autre peu inclinée, de manière à faire un prisme très-allongé, on observe à l'œil nu des bandes rouges et vertes, pourvu que l'on regarde d'un peu loin et que l'épaisseur du prisme près de son sommet ne dépasse pas un tiers ou la moitié d'un millimètre. Ces bandes parallèles sont plus vives quand on les regarde avec la tourmaline, et il est facile de reconnaître qu'elles atteignent leur maximum d'éclat quand la section principale du prisme fait avec le plan de polarisation un angle voisin de 45°. Ce phénomène rentre dans ceux que nous avons déjà décrits, et dont nous avons aussi indiqué la théorie.

M. Delezenne, qui a fait sur ce sujet un grand nombre d'observations très-intéressantes (*Société des sciences de Lille*), a constaté que tous les cristaux à un axe, taillés en lames à faces parallèles à l'axe et d'une épaisseur convenable, donnent, dans les mêmes circonstances, non plus des bandes parallèles, mais quatre systèmes de bandes hyperboliques très-bien caractérisées lorsqu'on les observe à la flamme de l'alcool salé, bien qu'on ne puisse rien observer de perceptible à la lumière blanche ordinaire.

Lorsqu'au lieu de soumettre à l'expérience un seul cristal, on prend, par exemple, des lames de cristal de roche épaisses de sept ou huit millimètres, légèrement prismatiques, parallèles à l'axe et posées l'une sur l'autre, de manière que les axes soient

Digitized by Google

croisés (Pl. 43, Fig. 25), on observe aussi quatre systèmes de bandes hyperboliques parfaitement régulières (Pl. 44, Fig. 24); mais pour cela il faut, après avoir mis les deux prismes dans la pince à tourmaline, approcher l'œil très-près, car, aussitôt que l'on regarde à une distance un peu grande, les hyperboles dégénèrent en bandes parallèles (Pl. 44, Fig 12, 13).

Les lames obliques à l'axe présentent aussi par leur croisement des bandes analogues : ainsi, quand on a travaillé une lame de cristal de roche de quatre ou cinq millimètres d'épaisseur, de manière que ses faces soient bien parallèles entre elles, et parallèles à l'une des faces de la pyramide qui termine ordinairement les cristaux naturels, et qu'ensuite on coupe cette lame pour en superposer les deux moitiés en croisant la ligne de section, le système qui en résulte donne aussi, dans la pince à tourmaline, des bandes parallèles très-vives. Si ces bandes sont dans le plan de polarisation de la lumière qui a traversé la première tourmaline, elles présentent au milieu une bande noire entre deux blanches, et se colorent ensuite de chaque côté (Fig. 12) : c'est le contraire quand elles sont perpendiculaires au plan primitif de polarisation, car on observe alors une bande blanche entre des noires, et toutes les couleurs précédentes renversées (Fig. 13).

C'est sur ce phénomène qu'est fondé le *polariscope* de Savart : cet appareil, qui est extrêmement sensible pour découvrir les moindres traces de lumière polarisée, se compose des deux quartz obliques et croisés dont nous venons de parler, sur lesquels on ajuste une tourmaline dont l'axe divise en deux parties égales l'angle des sections principales des deux quartz. En plaçant la tourmaline devant l'œil, et en regardant au travers de ce système, on distingue des bandes dès que la lumière incidente contient quelques portions polarisées. Il suffit alors de voir la direction de la bande, lorsqu'elle est le mieux marquée, pour avoir la direction du plan de polarisation. J'ai remarqué qu'une peau de baudruche, *translucide*, mise devant les quartz, rend les bandes beaucoup plus apparentes.

Cet appareil est très-commode pour observer la polarisation de la lumière atmosphérique.

Les lames taillées perpendiculairement à l'axe donnent aussi des franges analogues lorsqu'elles sont disposées, comme dans

Digitized by Google

l'appareil (Pl. 43, Fig. 33), pour être inclinées à volonté sur le rayon polarisé.

205. Divers phénomènes de polarisation qui se produisent dans les cristaux superposés, dans les cristaux colorés, dans le verre trempé, chauffé ou comprimé, etc. — Nous réunirons sous ce titre divers phénomènes dont la cause générale peut être indiquée, mais qui semblent, par leur complication, échapper à des mesures précises, et par conséquent à une analyse théorique assez simple et assez complète pour qu'il soit possible de l'entreprendre ici.

Lorsqu'on place entre deux tourmalines un cristal perpendiculaire à l'axe, deux lames croisées de cristal de roche donnant des bandes, les anneaux du cristal perpendiculaire sont altérés d'une manière remarquable, et qui varie avec l'inclinaison du système croisé : nous avons essayé de reproduire ces apparences (Pl. 44, Fig. 15). L'effet n'est pas symétrique, et l'on en peut tirer des moyens utiles pour reconnaître la direction du second axe quand on connaît le premier. M. Delezenne a fait beaucoup d'expériences intéressantes sur ce sujet (*Société de Lille*). Au lieu de faire l'expérience comme nous venons de l'indiquer, on peut la faire avec l'appareil (Pl. 43, Fig. 24), en mettant le système croisé près de la plaque perpendiculaire retenue dans la pince; on peut la faire encore à la lumière solaire avec l'appareil (Pl. 43, Fig. 21).

En substituant au système croisé une plaque donnant elle-même des anneaux, l'on peut obtenir encore des résultats analogues : c'est-à-dire déformation des anneaux; déplacement des couleurs; nouvelles bandes brillantes, tantôt circulaires, tantôt bizarrement contournées autour de l'axe unique ou du système des axes.

Cristaux colorés. — M. Babinet a remarqué que les cristaux colorés positifs laissent passer avec plus d'abondance la lumière polarisée dans un plan parallèle à l'axe ou au plan des axes, tandis que les cristaux négatifs laissent passer en plus grande abondance la lumière polarisée dans un plan perpendiculaire à l'axe ou au plan des axes; ainsi la tourmaline, qui est négative, absorbe complétement l'image ordinaire quand elle est assez colorée et assez épaisse, tandis que le quartz, qui est positif, absorbe l'image extraordinaire lorsqu'il est suffisamment enfumé.

Il y a des cristaux qui sont doués du *dichroïsme*, c'est-à-dire

Digitized by Google

qui donnent deux couleurs lorsqu'on les regarde dans des sens différents. Ainsi la dichroïte est jaune brun ou d'un beau bleu, suivant qu'elle est taillée perpendiculairement ou parallèlement à l'axe : l'hydrochlorate de potasse et de palladium est au contraire rouge ou vert dans les mêmes circonstances.

Verres trempés. — En plaçant sur le support *v* de l'appareil (Pl. 43, Fig. 17), des verres trempés de diverses formes, on aperçoit des couleurs vives, tantôt régulièrement, tantôt bizarrement arrangées, comme on le voit (Pl. 44, Fig. 20, 22, 23) : pour 20, le plan de l'analyseur est perpendiculaire au plan de polarisation, et les bords du verre font 45° avec ces deux plans ; pour 22 les bords du verre sont parallèles au plan de polarisation ; et pour 23, les bords du verre restant parallèles, l'analyseur a été tourné de 90°. Les figures 18 et 19 correspondent à des plaques rectangulaires superposées et de même épaisseur ; dans la figure 18 la courbe elliptique résulte de la plus grande largeur de l'une des plaques.

Les mêmes effets s'obtiennent à la lumière solaire, en disposant les verres dans du liége (Pl. 43, Fig. 32), pour les mettre ensuite en avant de la première lentille dans l'appareil de la figure 21. Ces phénomènes résultent évidemment de l'arrangement particulier et accidentel que le brusque refroidissement a imprimé aux molécules du verre. Il suffit, en effet, de chauffer les verres lentement pour faire disparaître les couleurs.

Verre chauffé. — Après avoir fait chauffer à 100 ou 150° l'espèce de moule (Pl. 43, Fig. 29), on y introduit une pièce de verre qui, en se dilatant près de ses bords, met toutes ses molécules dans un état de tension qui développe aussi des couleurs dans la lumière polarisée. Le prompt refroidissement produit des effets analogues.

Verre ployé. — On voit (Pl. 43, Fig. 31) une presse destinée à fléchir une lame de verre longue et épaisse ; pendant cet état forcé, elle développe des bandes colorées à peu près parallèles entre elles, et parallèles à la flexion.

Verre comprimé. — En comprimant une lame carrée de verre dans la presse (Pl. 43, Fig. 30), on voit, dans le sens de la compression, un commencement d'apparence de deux axes.

204. Houppes colorées de la lumière polarisée. — M. Haidinguer a découvert un caractère très-remarquable qui, à la première vue, et sans le secours d'aucun appareil, permet de dis-

Digitized by Google

tinguer la lumière polarisée de celle qui ne l'est pas, et même de reconnaître quelle est la direction du plan de polarisation. Pour saisir ce caractère, on procède de la manière suivante : on dirige l'œil vers le ciel, sans regarder avec trop de fixité et cependant sans changer la direction de l'axe visuel ; alors, portant un prisme de Nicol devant l'œil, on aperçoit, sur la région du ciel que l'on regardait, une croix vague et diffuse composée de quatre houppes, deux jaunes et deux violettes, telles qu'elles sont représentées en *j*, *j* et en *v*, *v* (Pl. 44, Fig. 21). Si elles n'apparaissent pas immédiatement, il suffit de tourner le prisme un peu rapidement dans la main, sans trop changer la direction de l'axe, pour les apercevoir par le déplacement qu'elles éprouvent dans le champ de la vision. Une fois qu'on les a trouvées, il est facile de constater, 1° que les deux houppes jaunes marquent la direction du plan de polarisation ; 2° que le système complet des quatre houppes tourne avec le plan de polarisation du rayon qui traverse le prisme, ou avec la section principale du prisme lui-même.

L'expérience paraît un peu plus facile à faire quand le ciel est un peu couvert, sans être très-éclatant, mais elle réussit cependant quand le ciel est serein.

Or, la lumière du ciel étant en général polarisée par elle-même, du moins en partie, il arrive que, pour l'œil exercé, le prisme de Nicol n'est pas nécessaire ; en regardant directement le ciel lui-même, sans aucun appareil, on aperçoit les houppes, et l'on reconnaît ainsi la direction du plan de polarisation ; car jamais la lumière naturelle n'est accompagnée de ces couleurs jaunes et violettes.

Les hypothèses que l'on a proposées, pour expliquer ce singulier phénomène, paraissent peu plausibles, excepté peut-être celle que M. Jamin a présentée à l'Académie (*Comptes rendus de* 1848, t. XXVI).

205. Microscope polarisant d'Amici. — M. Amici donne le nom de microscope polarisant à un appareil très-intéressant, qu'il a récemment inventé, et qui est destiné à étudier les phénomènes de polarisation chromatique. Cet appareil est représenté (Pl. 45, Fig. 16, 17) ; il se compose 1° d'une glace d'Allemagne *g*, qui reçoit la lumière du ciel ou celle d'une lampe, et qui peut s'incliner plus ou moins sur son support.

2° D'une pile de glaces *g'*, formée de 11 glaces minces, dis-

Digitized by Google

posées librement dans une monture commune, et recevant la lumière réfléchie sur la glace *g*, pour la renvoyer à son tour par réflexion dans la direction verticale de l'instrument, mais sous l'angle de la polarisation complète, c'est-à-dire d'environ 35°; cet angle se mesure sur le cadran dont l'axe de rotation de la pile forme le centre.

3° De trois systèmes de verre, disposés sur le même axe, et recevant, pour en modifier la convergence, le rayon vertical, presque complétement polarisé.

De ces trois systèmes de verre, le premier, monté sur un tube très-court *a*, est composé de deux lentilles, et constitue le système lenticulaire éclairant; il peut s'enlever à volonté.

Le deuxième, monté sur un long tube *b*, n'est autre chose qu'un oculaire *positif* ou de Ramsden.

Le troisième, monté sur un tube *c*, se compose d'un objectif *d* et d'un oculaire d'Huyghens *e*; la distance focale principale de l'objectif *d* est d'environ 60 millimètres seulement, et l'ensemble de l'objectif et de l'oculaire constitue un microscope, ou, si l'on veut, une lunette pareille à celle du cathétomètre, grossissant environ 12 ou 15 fois.

4° Au-dessus du dernier verre de l'oculaire *e*, se trouve un analyseur, qui est un simple rhombe de spath.

Avec le microscope polarisant on peut faire trois séries d'expériences différentes : 1° on peut observer les anneaux des cristaux à un axe ou à deux axes; 2° les verres trempés, les phénomènes de coloration des lames minces et autres semblables; 3° les phénomènes produits par les parallélipipèdes de Fresnel, représentés (Pl. 43, Fig. 27). On y procède de la manière suivante :

Première série. — L'appareil se dispose comme dans la figure 16, avec l'attention de placer le tube *b* sur le tube *c*, de telle sorte que ce double système compose une véritable lunette dont les trois verres du système *c* représentent l'objectif, si bien que l'on peut mettre au point l'appareil en regardant un objet éloigné par l'oculaire du tube *b;* aussitôt que cet objet sera vu nettement, les deux tubes *b* et *c* seront dans la position respective convenable pour les expériences. Cela posé, on n'a plus qu'à placer immédiatement sur le système éclairant *a* les cristaux que l'on veut soumettre à l'observation, savoir : spath perpendiculaire à l'axe, et autres cristaux à un axe; mica à deux axes, carbonate de plomb, nitrate de potasse, etc.; apophyllite,

Digitized by Google

brochite, zircon, etc.; cristal de roche donnant les spirales ou les bandes, etc.

L'avantage de ce système d'observation est d'exiger seulement pour les diverses expériences des échantillons très-petits et presque microscopiques, et de faire voir cependant tous les phénomènes de la manière la plus complète. Ainsi, un fragment de brochite d'un millimètre carré de surface et très-mince, qui ne donnerait rien de perceptible dans la pince à tourmaline, donne ici la croix et ces sortes d'hyperboles très-remarquables qui distinguent ce cristal. Sur une lame de mica mince et étroite, on distingue pareillement les deux systèmes d'axe qui ne seraient visibles autrement que sur des échantillons incomparablement plus larges et plus épais.

Un fragment très-petit d'un cristal, disposé entre deux verres, avec une goutte de térébenthine, fait voir immédiatement des couleurs, qui sont presque toujours suffisantes pour caractériser le cristal.

Deuxième série. — L'appareil se dispose comme dans la figure 17; le tube *b* est enlevé ainsi que le système éclairant *a*, qui se remplace par une simple lame de verre servant de support. C'est sur cette lame de verre que l'on dispose les objets. S'ils sont très-petits, si l'on veut, par exemple, observer des fragments d'apophyllite d'un millimètre, on peut remplacer l'objectif *d* par un autre d'un foyer plus court, et donnant, par exemple, avec l'oculaire *c*, un grossissement de 50 ou 60 fois.

Troisième série. — L'appareil se dispose de la manière suivante : le support du système éclairant *a* est enlevé; les parallélipipèdes de Fresnel sont montés dans un anneau de métal, et s'adaptent sur le support *ik* (Fig. 16 et 17); leur monture est telle qu'ils peuvent se séparer, et que l'on peut faire l'expérience avec un seul ou avec le système des deux. Nous décrirons dans le chapitre suivant les phénomènes qui s'observent alors; mais ici ils peuvent s'étudier plus complétement, parce qu'on peut aisément, au-dessus des parallélipipèdes, disposer des lames de cristal de roche ou autres, pour observer les couleurs produites par la lumière plusieurs fois réfléchie dans les parallélipipèdes, et dans des plans plus ou moins inclinés sur le plan de polarisation.

206. Expériences de M. de Senarmont sur la polarisation chromatique des substances biréfringentes et isomorphes. — Le microscope que nous venons de décrire a rendu de grands

Digitized by Google

services à la science, entre les mains de M. de Senarmont, qui s'en est habilement servi dans ses recherches d'optique minéralogique (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXIII, ann. 1851, t. XXXIV, ann. 1852). Je ne pourrais pas, sans sortir du cadre que je me suis tracé, faire connaître ici les questions fondamentales que traite M. de Senarmont et les discussions à la fois claires et profondes par lesquelles il apprécie, à leur juste valeur, les caractères qui résultent de la forme cristallographique et ceux qui résultent des propriétés optiques. Cependant, pour en donner une idée, je m'empresse de citer le passage suivant, qui termine son premier mémoire, et qui semble indiquer à l'avance les phénomènes contenus dans son second mémoire sur les nombreuses variétés de mica.

« Trois ordres de faits résultent des expériences précédentes, et en présentent en quelque sorte le résumé.

« On voit d'abord dans des groupes nombreux de substances géométriquement et chimiquement isomorphes une similitude de propriétés optiques, tout à fait comparable à la similitude de leurs formes cristallines; l'isomorphisme lui-même tolère dans les éléments géométriques des écarts à peu près du même ordre, et la concordance est telle qu'on devait l'attendre d'une différence spécifique de nature avec une identité de structure presque complète.

« Tels sont, par exemple, les biarséniates et biphosphates de potasse et d'ammoniaque; les chlorures doubles de cuivre et de potassium, de cuivre et d'ammonium; les sulfates de zinc et de magnésie, le chromate de magnésie; les sulfates de baryte, de strontiane, de plomb; puis le phosphate et l'arséniate neutre de soude; et le groupe nombreux des sels doubles formés par l'union des sulfates de potasse ou d'ammoniaque avec presque tous les oxydes de la famille magnésienne.

« La presque identité de propriétés optiques est surtout remarquable dans ces derniers sels réductibles au prisme oblique symétrique. Non-seulement, en effet, les valeurs des trois élasticités principales conservent à peu près le même rapport, mais les axes d'élasticité homologues ont presque la même direction dans le cristal, et cependant cette direction n'est pas ici une conséquence forcée de la symétrie géométrique.

« Les exceptions ne tardent pas ensuite à se manifester, et l'on arrive aux tartrates gauches et droits (voy. les expériences

Digitized by Google

de M. Pasteur dans le chapitre suivant). Ces sels sont complétement isomorphes géométriquement, puisqu'ils présentent l'hémiédrie non superposable; ils ne le sont pas davantage chimiquement, puisque la même composition élémentaire ne les empêche pas de se combiner avec dégagement de chaleur, en proportions définies pour former un composé différent de chacun d'eux, par sa figure spéciale, par une composition et des propriétés chimiques particulières : or, ces tartrates gauches et droits non isomorphes présentent une identité complète, absolue, de propriétés biréfringentes.

« On trouve enfin une troisième classe de composés, isomorphes géométriquement par la similitude parfaite de leur forme, isomorphes chimiquement par leur composition élémentaire, par leurs affections chimiques, par leur aptitude à s'allier en cristallisant, qui possèdent néanmoins des propriétés optiques tout à fait opposées.

« C'est ainsi qu'on a vu, dans les hyposulfates de chaux, de strontiane, de plomb, l'axe unique de double réfraction devenir une direction tantôt de plus grande, tantôt de plus petite élasticité optique, l'axe d'élasticité moyenne situé de la même manière dans le chromate et le sulfate de potasse, mais l'axe de plus petite et de plus grande élasticité faire un échange de directions réciproques, enfin dans l'arragonite et le plomb carbonaté, le même échange se faire entre les axes de plus petite et de moyenne élasticité, tandis que l'axe de plus grande élasticité demeure dans une direction invariable.

« Le tartrate double de soude et de potasse, celui de soude et d'ammoniaque, montrent les mêmes différences rendues encore plus frappantes par la dispersion très-particulière des axes optiques propres aux différentes couleurs. Toutes les remarquables propriétés signalées par M. Herschel dans le sel de Seignette potassique se trouvent dans ce qu'on peut appeler le sel de Seignette ammoniacal. Écartement des axes optiques presque le même, dispersion au moins égale des axes différemment colorés, et par conséquent même confusion de couleurs, même déformation des courbes isochromatiques : tout est semblable de part et d'autre, mais les axes optiques sont ouverts dans les plans diamétraux rectangulaires.

« Il est donc bien constaté que l'élasticité du milieu éthéré se présentera dans certaines substances isomorphes avec une in-

version complète de grandeur relative, suivant les mèmes directions. Or, comme cette élasticité prend dans les cristaux des valeurs inégales, en sens divers, sous l'empire des forces émanées du réseau moléculaire, les résultantes qui s'exercent suivant ces directions doivent présenter la même inversion de grandeur, sans que les formes éprouvent d'ailleurs aucune altération bien essentielle dans leurs angles et dans la disposition de leurs faces.

« Si cette espèce de mobilité des propriétés optiques dans une même enveloppe géométrique avait besoin d'autres preuves, on les trouverait sans doute dans les singuliers phénomènes que présentent les alliages cristallins des substances isomorphes douées de ces propriétés optiques opposées. »

CHAPITRE IV.

Polarisation rotatoire atomique et magnétique.

207. Je rapproche dans ce chapitre deux ordres de phénomènes qui ont à la fois des analogies incontestables et des différences caractéristiques; il m'a semblé que c'était le moyen de mieux faire ressortir l'importance de la découverte de M. Faraday, et d'appeler d'une manière plus directe l'attention des jeunes physiciens sur ces modifications extraordinaires que les vibrations lumineuses reçoivent, soit de la constitution primitive et permanente des corps, soit de la constitution accidentelle et passagère que le magnétisme semble imprimer ou à leurs molécules pondérables ou à la substance éthérée qui les enveloppe. J'avais tenu jusqu'à présent à conserver le nom de *polarisation circulaire* que Fresnel avait donné au phénomène de la rotation des plans de polarisation; mais je me range volontiers à l'avis des physiciens qui préfèrent le nom de *polarisation rotatoire;* c'est en effet une expression plus générale et qui prête moins à l'équivoque, puisque la polarisation dont il s'agit peut se montrer rectiligne et elliptique aussi bien que circulaire.

§ 1. *Polarisation rotatoire atomique.*

208. Phénomènes de coloration des plaques de quartz perpendiculaires à l'axe du cristal, découverts par M. Arago. — Ces phénomènes se produisent dans les conditions suivantes : un rayon de lumière blanche et polarisée traverse perpendiculairement une lame de cristal de roche à faces parallèles et perpendiculaires à l'axe, ayant une épaisseur comprise entre 1 et 20 ou 30 millimètres; au sortir du cristal, ce rayon est blanc quand on le regarde à l'œil nu, et semble n'avoir éprouvé aucune modification; mais il se colore des plus vives couleurs lorsqu'on vient le regarder avec un prisme biréfringent.

L'expérience peut se faire avec la lumière des nuées ou par

Digitized by Google

projection avec un trait de lumière artificielle ou de lumière solaire.

Pour la lumière des nuées on emploie l'appareil (Pl. 43, Fig. 17); la plaque de quartz étant posée sur le support v, on la regarde avec un analyseur biréfringent qui ne donne pas une trop grande séparation des images; alors on voit les deux faisceaux superposés en partie (Pl. 44, Fig. 1); la portion commune reste blanche, et les autres portions du faisceau ordinaire et du faisceau extraordinaire sont colorées de magnifiques nuances complémentaires l'une de l'autre; et bien exactement complémentaires, puisqu'au milieu leur superposition donne du blanc.

Faites tourner la plaque sur elle-même, le phénomène n'éprouve aucune modification; laissez la plaque immobile et faites tourner au contraire le prisme biréfringent, pour changer la position de sa section principale par rapport au plan de polarisation primitif du rayon incident, alors les couleurs varient sans cesse, tout en restant complémentaires; elles montent ou descendent dans l'ordre des anneaux, les deux images changeant de rôle tour à tour, pour reprendre leurs nuances respectives quand l'analyseur a décrit une circonférence entière; c'est ce qui est représenté (Pl. 44, Fig. 14).

Les expériences sont encore plus curieuses et plus éclatantes quand on opère par projection avec la lumière solaire (Pl. 43, Fig. 21), ou avec l'appareil photo-électrique (Pl. 36, Fig. 1), comme nous l'avons expliqué précédemment (**199**).

Tels sont les phénomènes si importants pour la science que M. Arago a découverts en 1811, presque à la naissance de la polarisation, six mois avant la mort de Malus; en même temps qu'il découvrait aussi les premiers phénomènes de coloration des lames minces cristallisées, et de certains morceaux de verre à faces parallèles. Ses moyens d'observation, qui ne pouvaient pas être ceux que nous venons de décrire, lui avaient permis cependant de reconnaître distinctement que les plaques de quartz faisaient tourner le plan primitif de polarisation; il l'avait conclu de ce que le changement de la section principale du prisme analyseur exerçait une grande influence, tandis que le changement de position de la lame n'en exerçait aucune (*Mém. de l'Instit., classe des sc. math. et phys. pour l'année* 1811, publié en 1812).

209. Lois expérimentales établies par M. Biot. — Décou-

Digitized by Google

verte des quartz inverses et des pouvoirs rotatoires des liquides et des gaz. — M. Biot a analysé ces phénomènes si compliqués, et par un admirable enchaînement d'expériences, il est parvenu à en découvrir les lois fondamentales. Ses premières recherches sur ce sujet sont consignées dans deux mémoires, l'un de 1813 (*Mém. de l'Institut, classe des sc. math. et phys. pour l'année* 1812, publiés en 1814); l'autre de 1818 (*Mém. de l'Acad. royale des sciences*, t. II, *pour l'année* 1817). Je donnerai d'abord l'énoncé de ces lois, j'essayerai ensuite d'indiquer rapidement les méthodes d'observation, regrettant de ne pouvoir pas les exposer avec tous leurs développements.

Première loi. — Pour toutes les plaques tirées d'un même cristal, la rotation du plan de polarisation est proportionnelle à l'épaisseur.

Deuxième loi. — Il y a des cristaux de quartz qui font tourner *à droite* le plan de polarisation, d'autres qui le font tourner *à gauche;* mais dans les uns et les autres la même épaisseur produit le même effet.

Troisième loi. — En associant divers cristaux de quartz, l'effet définitif est proportionnel à leur somme, s'ils agissent dans le même sens, à leur différence, s'ils agissent en sens contraire.

Quatrième loi. — Quel que soit le sens de la déviation, sa grandeur augmente avec la réfrangibilité, et elle est inversement proportionnelle au carré de la longueur des accès, c'est-à-dire, au carré des longueurs d'onde.

Cinquième loi. — Pour une lame de quartz de 1 millimètre d'épaisseur la grandeur absolue des déviations est exprimée par les nombres suivants :

	Longueur d'ondulation.	Déviation du plan de polarisation.		
Rouge extrême de Newton......	645	17°,50	ou	17°30'
Rouge du verre de M. Biot.....	628	18 ,414		18 25
Limite du rouge et de l'orangé..	596	20 ,00		20 00
Id de l'orangé et du jaune...	571	22 ,27		22 16
Jaune moyen................	550	24 ,00		24 00
Limite du jaune et du vert.....	532	25 ,66		25 40
Id. du vert et du bleu......	492	30 ,00		30 00
Id. du bleu et de l'indigo....	459	34 ,47		34 28
Id. de l'indigo et du violet...	439	37 ,68		37 41
Violet extrême de Newton......	406	44 ,06		44 04

L'appareil primitif avec lequel M. Biot étudiait ces phéno-

mènes, se composait d'une glace réfléchissante comme polariseur, d'un tube de cuivre muni d'un diaphragme, et d'une monture perpendiculaire à son axe sur laquelle s'adaptait la lame de quartz, enfin d'un cercle gradué aussi perpendiculaire à l'axe du tube, portant une alidade mobile sur laquelle était fixé le prisme analyseur, et qui donnait l'angle de sa section principale avec le plan primitif de polarisation; nous verrons plus loin (**211**) cet appareil avec tous ses perfectionnements les plus récents.

La première loi a été constatée avec une nombreuse série de lames, tirées d'un même cristal et dont les épaisseurs étaient mesurées au sphéromètre; un verre rouge étant interposé devant l'analyseur, on faisait marcher l'alidade jusqu'à l'extinction du faisceau transmis par le quartz, et l'on connaissait ainsi pour cette espèce de couleur, l'angle dont le plan de polarisation avait été dévié; les résultats montrent que cet angle est proportionnel à l'épaisseur de la plaque.

La deuxième loi a été constatée comme la première; M. Biot, en cherchant si tous les cristaux avaient le même pouvoir, trouva heureusement des échantillons qui exerçaient une action inverse, et il lui fut facile, par sa méthode, de constater que si le sens de l'action était renversé, l'intensité cependant restait la même.

C'est six ans plus tard, en 1819, que M. Brewster trouva des échantillons d'améthyste, qui offraient des plages où les actions contraires étaient superposées.

C'est en 1820 que M. Herschel fit la remarque très-importante, que le sens de l'action du cristal de roche dépend de la forme cristalline; l'inclinaison de certaines facettes, dans la variété *plagièdre*, indiquant infailliblement le sens de la rotation.

La troisième loi se démontre comme les précédentes au moyen du verre rouge; et il est facile de reconnaître que l'effet définitif des lames placées sur le trajet du rayon polarisé est indépendant de la distance qui existe entre elles et de l'ordre dans lequel elles agissent; on peut les mêler dans un ordre quelconque pourvu qu'elles restent toutes perpendiculaires au rayon.

La quatrième loi présentait de très-grandes difficultés : il fallait opérer avec les diverses couleurs simples du spectre, et dans chaque couleur choisir avec exactitude la même nuance dans les diverses séries d'expériences; on ne se figure pas aisément combien il faut d'esprit d'invention, de patience et d'habitude

expérimentale pour arriver à des mesures précises dans ces sortes de recherches. On n'avait pas alors pour guide la découverte de Frauenhofer sur les raies du spectre, qui aurait rendu le problème beaucoup plus simple. Les diverses couleurs données par le prisme étaient donc polarisées tour à tour; l'analyseur, soit par le maximum d'éclat, soit par l'extinction de l'image, donnait la déviation correspondante du plan de polarisation; ensuite il fallait, dans ces nombreuses colonnes de résultats, démêler quelques rapports entre les angles de rotation des diverses couleurs et les longueurs d'onde qui leur appartiennent.

La cinquième loi ne présentait plus aucune difficulté après la quatrième, puisque tout se réduisait à observer avec précision l'épaisseur absolue d'une lame et l'énergie de son action sur l'une des couleurs; c'est ensuite par le calcul que l'on détermine et l'effet correspondant à 1 millimètre, et les dispersions des autres couleurs pour cette épaisseur.

M. Biot a voulu soumettre ces données fondamentales à une épreuve bien importante et bien décisive; il a voulu, en se servant de ces seuls éléments et de la règle de Newton pour la recomposition des couleurs (**96**), reconstruire par le calcul les diverses nuances de l'image ordinaire et de l'image extraordinaire que lui présentaient ses nombreuses plaques lorsqu'il les observait en plaçant la section principale du prisme analyseur dans le plan primitif de polarisation. Ces résultats ont confirmé d'une manière très-remarquable et l'exactitude des lois dont il s'agit et l'exactitude de la règle de Newton appliquée à la composition de nuances si variées. Il me serait impossible d'exposer ici cette longue série de déductions; mais je dois essayer de faire comprendre un phénomène particulier de coloration que M. Biot avait remarqué dans le cours de ses recherches, et qui est devenu entre ses mains un moyen précieux pour étendre le champ des découvertes de la polarisation rotatoire : c'est le phénomène de la *teinte de passage*, ou de la *teinte sensible*.

Teinte sensible. — Lorsqu'on opère avec la lumière blanche des nuées, la couleur, comme nous l'avons dit, change sans cesse, par le mouvement de l'analyseur; et, quand les déviations ne sont pas trop grandes, quand le plan de polarisation du rouge n'est pas dévié de plus de 140 ou 150°, on trouve toujours une position dans laquelle l'image extraordinaire se fait remarquer par sa faible intensité relative et surtout par la propriété dont

Digitized by Google

elle jouit alors de passer, ou au rouge vif, ou au bleu bien caractérisé, suivant qu'on déplace un peu la section principale de l'analyseur dans un sens ou dans l'autre. Dans la position intermédiaire, entre le rouge et le bleu, l'image a une couleur gris de lin, ou bleu pâle violacé, qui est la teinte sensible; mais, il ne faut pas s'y méprendre, elle est moins caractérisée par sa nuance propre, dont la composition peut varier entre certaines limites, que par la propriété qu'elle a de passer au rouge ou au bleu, par un très-petit mouvement du prisme. Ici, le prisme est achromatisé pour l'image extraordinaire, par conséquent il ne peut pas l'être exactement pour l'image ordinaire : aussi, en tournant le prisme de 90°, la teinte sensible ne se reproduit pas d'une manière nette, comme image ordinaire.

La teinte sensible ne se produit bien qu'avec la lumière blanche, et son apparition est alors tellement caractéristique qu'elle peut servir aussi bien que le verre rouge, et souvent mieux que lui, pour déterminer le mouvement des plans de polarisation. M. Biot a d'abord reconnu, par un grand nombre de mesures prises sur des plaques diverses, que pour obtenir la teinte sensible il faut faire tourner la section de l'analyseur beaucoup plus que pour obtenir le maximum d'éclat de l'image ordinaire avec le verre rouge, et que le premier angle est les $\frac{30}{23}$ du second. Ce rapport bien vérifié donne immédiatement la longueur d'onde x que doit avoir la lumière qui compose l'image ordinaire dont la teinte sensible est l'image extraordinaire; car, λ étant la longueur d'onde du verre rouge dont se servait M. Biot, longueur qui a été vérifiée encore récemment (*Comptes rendus*, t. XXI, ann. 1845) et trouvée de 628 millionièmes de millimètre, comme nous l'avons indiqué dans le tableau précédent, on a

$$\frac{x^2}{\lambda^2}=\frac{23}{30};\quad x=\lambda\sqrt{\frac{23}{30}};\quad x=550.$$

Cette longueur d'onde est celle d'un jaune moyen, qui n'est pas tout à fait au milieu du jaune. Donc, quand on observe la teinte sensible, comme image extraordinaire, l'image ordinaire correspondante est principalement composée de lumière jaune; par conséquent la section principale de l'analyseur doit se trouver à très-peu près dans le plan de polarisation de ce jaune moyen. M. Biot a fait le calcul exact des teintes qui doivent alors se produire, mais il est possible de s'en rendre compte

Digitized by Google

approximativement par les considérations suivantes : e désignant l'épaisseur de la lame de quartz en millimètres, les déviations des plans de polarisation des diverses couleurs par rapport à la section principale sont alors,

Limite du rouge (24°—17°,50)e.....	6°,50.e
Rouge du verre de M. Biot........	5,59.e
Limite du rouge et de l'orangé......	4,00.e
Id. de l'orangé et du jaune......	1,73.e
Jaune moyen....................	0,00
Limite du jaune et du vert.........	1,66.e
Id. du vert et du bleu..........	6,00.e
Id. du bleu et de l'indigo.......	10,47.e
Id. de l'indigo et du violet......	14,68.e
Violet extrême..................	20,06.e

Ainsi, lorsqu'on vient, conformément à la loi de Malus, multiplier la demi-intensité de chaque rayon, soit par le carré du cosinus de l'angle de son plan de polarisation pour former l'image ordinaire, soit par le carré du sinus pour former l'image extraordinaire, on voit que celle-ci reste très-faible, tant que e ne prend pas des valeurs de 3 ou 4 unités et qu'elle ne se compose d'abord que de quelques rayons violets, bleus et indigos, avec très-peu de rouge extrême; mais elle change de composition à mesure que e augmente, et lorsqu'il atteint des valeurs de 7 ou 8 millimètres, le jaune et l'orangé y manquent encore, le vert et le rouge commencent à y entrer en bonne proportion, le bleu et l'indigo presque en totalité, tandis qu'une partie du violet repasse à l'image ordinaire. On comprend ainsi la marche générale du phénomène : la composition variable de la teinte sensible, à mesure que l'épaisseur change, et cependant son double caractère de rester à peu près dans les mêmes nuances et de conserver, jusqu'à d'assez grandes épaisseurs, la propriété de passer du bleu au rouge pour un petit mouvement du prisme analyseur.

C'est ce que nous avons représenté (Pl. 44, Fig. 16, 17) pour des épaisseurs de quartz de $3^{mm},75$ et de $7^{mm},50$; pour la première (Fig. 16), la rotation est à gauche du plan primitif de polarisation po', et la section principale ss' perpendiculaire à ce plan est dans le jaune moyen; avec la seconde (Fig. 17), la rotation est pareillement à gauche, et la section principale coïn-

cide alors avec le plan primitif de polarisation; les rayons *or'* indiquent le rouge de M. Biot, et les rayons *uh* le violet extrême.

Ces développements relatifs à la teinte sensible ne seraient en quelque sorte qu'une satisfaction théorique, si le quartz était le seul corps doué de la propriété rotatoire, mais ils acquièrent une grande importance par la variété des substances dans lesquelles M. Biot a découvert ces propriétés. D'abord, en 1815 dans l'essence de térébenthine liquide, en 1818 dans la vapeur de cette essence, ce qui a constaté d'une manière bien décisive que les actions dont il s'agit appartiennent aux molécules constitutives des corps et non pas aux arrangements accidentels et divers que ces molécules peuvent prendre soit à l'état solide, soit à l'état liquide; ensuite, pendant la même période, dans l'essence de citron, le camphre et le sucre, tantôt mélangés, tantôt combinés avec des corps de diverses natures, et conservant cependant leur action propre à raison de leur quantité pondérable. Avant d'indiquer combien ces phénomènes ont pris d'extension, nous devons faire connaître ici la théorie que Fresnel en a donnée, en 1817 et 1818, à l'époque même où M. Biot en établissait les lois expérimentales.

210. Théorie de Fresnel. — Fresnel suppose que les vibrations lumineuses s'exécutent dans le sens même de la surface des ondes, perpendiculairement à la direction des rayons, et qu'un faisceau polarisé est celui pour lequel ces vibrations ont toujours la même direction, son plan de polarisation étant le plan auquel ces petits mouvements oscillatoires des molécules éthérées restent constamment perpendiculaires : or, il suit de là que, si deux systèmes d'ondes d'égale intensité et polarisés rectangulairement, c'est-à-dire dont les mouvements oscillatoires sont perpendiculaires entre eux, diffèrent dans leur marche d'un quart d'ondulation, le mouvement composé qu'ils imprimeront à chaque molécule, au lieu d'être rectiligne comme dans les deux faisceaux considérés séparément, sera circulaire et s'exécutera avec une vitesse uniforme : les molécules tourneront de droite à gauche lorsque le système d'ondes en avant aura son plan de polarisation à droite de celui du système d'ondes en arrière d'un quart d'ondulation, et elles tourneront de gauche à droite lorsque le premier plan sera à gauche du second, ou lorsque, les plans de polarisation restant disposés comme dans le premier cas, la différence de marche sera égale à trois quarts d'ondulation. Si la différence

Digitized by Google

de marche, au lieu d'être un nombre pair ou impair de quarts d'ondulation, était un nombre fractionnaire, les mouvements vibratoires ne seraient ni rectilignes ni circulaires, mais elliptiques.

On conçoit que, dans cette rotation générale des molécules autour de leurs positions d'équilibre, elles n'occupent pas au même instant les mêmes points des circonférences qu'elles décrivent, vu le mouvement progressif des ondes. Pour se représenter leurs positions relatives, il faut concevoir que celles qui étaient sur une même droite parallèle au rayon, dans l'état d'équilibre, se trouvent maintenant placées sur une hélice très-étroite, décrite autour de cette ligne droite comme axe, et dont le pas est égal à la longueur d'une ondulation. Si l'on fait tourner maintenant cette hélice autour de son axe d'un mouvement uniforme, de manière qu'elle décrive une circonférence dans l'intervalle de temps pendant lequel s'accomplit une ondulation lumineuse, et que l'on conçoive d'ailleurs que, dans chaque tranche infiniment mince perpendiculaire au rayon, toutes les molécules exécutent les mêmes mouvements et conservent les mêmes situations respectives, on aura une idée exacte du genre de vibrations qui constitue la polarisation circulaire.

Mais il résulte aussi de la théorie mécanique des interférences, qu'un système d'ondes polarisé *rectilignement* peut être remplacé par deux autres systèmes polarisés à angle droit entre eux et coïncidents dans leur marche. De plus, chacun de ceux-ci peut être remplacé par deux autres systèmes polarisés dans le même plan, ayant sur lui, l'un une avance d'un huitième, et l'autre un retard d'un huitième d'ondulation, et par conséquent séparés entre eux par un quart d'ondulation; ce qui donne quatre systèmes d'ondes d'égale intensité, dont deux, polarisés à angle droit, sont en arrière d'un quart d'ondulation des deux autres, polarisés aussi à angle droit. Si maintenant l'on prend ces systèmes pour les combiner *en croix*, c'est-à-dire chacun de ceux qui sont en arrière avec celui qui est en avant, et polarisé à angle droit avec lui, on voit que l'on aura précisément deux faisceaux égaux, d'accord entre eux, et polarisés circulairement, l'un de droite à gauche et l'autre de gauche à droite.

Donc, en définitive, tout faisceau d'une intensité égale à 1 et polarisé *rectilignement* peut toujours être remplacé par deux faisceaux polarisés *circulairement*, d'accord entre eux, ayant chacun

Digitized by Google

une intensité $\frac{1}{2}$, et tournant l'un de gauche à droite, et l'autre de droite à gauche. Réciproquement, un système de deux faisceaux polarisés *circulairement* reproduit toujours un faisceau polarisé *rectilignement* dans un plan unique, mais avec cette condition indiquée par la théorie, que, si les deux faisceaux polarisés circulairement acquièrent dans leur trajet quelque différence de marche, le plan de polarisation du faisceau polarisé *rectilignement* qui peut les remplacer, aura tourné de droite à gauche ou de gauche à droite, d'un angle proportionnel à la différence de marche. La rotation aura lieu de droite à gauche ou de gauche à droite, suivant que le faisceau polarisé circulairement de gauche à droite aura gagné de l'avance ou éprouvé du retard. (Voyez chap. v, proposit. vii).

Il est évident, d'après ces notions, que, s'il se rencontre dans la nature quelque substance qui jouisse de la singulière propriété de transmettre, avec des vitesses différentes, les faisceaux polarisés circulairement de droite à gauche et ceux qui sont polarisés de gauche à droite, tout faisceau polarisé rectilignement devra, en traversant ces substances, éprouver un mouvement de rotation dans son plan de polarisation : ce mouvement s'accomplira dans un sens ou dans l'autre, suivant que l'un des systèmes aura gagné de l'avance ou éprouvé du retard ; il sera proportionnel à l'épaisseur de la substance traversée ; et enfin il dépendra, suivant certaines lois, de la longueur des ondulations de la lumière.

Telle est l'explication donnée par Fresnel des phénomènes que présente le cristal de roche perpendiculaire à l'axe. Pour en saisir la clef, tout se réduit, comme on voit, à bien comprendre qu'un faisceau polarisé *rectilignement* peut être remplacé par un système de deux faisceaux polarisés *circulairement* en sens contraire, et à admettre que, de ces deux systèmes, l'un va plus vite que l'autre lorsqu'ils traversent certains corps.

Ce second point pouvait paraître tout à fait hypothétique : aussi Fresnel a-t-il mis tous ses soins à le démontrer d'une manière directe, et il y est parvenu par une expérience décisive dont nous allons rendre compte.

Double réfraction du cristal de roche dans le sens de son axe. — Le cylindre *abcd* (Pl. 43, Fig. 26) est composé de 3 prismes de cristal de roche travaillés séparément, et ensuite ajustés avec beaucoup de soin. Celui du milieu *asb* a son angle.

Digitized by Google

au sommet *s*, de 152°; il est tiré d'une aiguille de quartz, qui fait, par exemple, tourner le plan de droite à gauche, et ses deux faces latérales *as* et *sb* sont également inclinées sur l'axe. Les deux prismes extrêmes *das* et *cbs* sont tirés d'une aiguille de quartz qui fait tourner le plan en sens contraire, c'est-à-dire de gauche à droite; ils ont leurs faces *ad* et *cb* exactement perpendiculaires à l'axe, et leurs faces *as* et *bs* convenablement inclinées pour que les axes optiques des trois prismes se trouvent dans la même direction. Maintenant, si l'on fait passer dans cette direction un rayon polarisé, on reconnaît qu'il se divise en deux, et donne, après son émergence, deux rayons divergents. Donc, le cristal de roche exerce une double réfraction dans le sens de son axe, et cette double réfraction ne ressemble en rien à celle qui se fait à l'ordinaire dans le quartz et dans les autres cristaux; car les deux faisceaux émergents ne donnent ni l'un ni l'autre aucune trace apparente de polarisation : du moins, chacun d'eux donne toujours deux images blanches et également intenses, lorsqu'on les analyse avec le prisme bi-réfringent.

Ce phénomène remarquable est la preuve directe que les faisceaux polarisés circulairement en sens contraire ne se propagent pas avec la même vitesse en suivant l'axe du cristal de roche, et que celui des deux qui va le plus vite dans les deux prismes extrêmes va le plus lentement dans le prisme du milieu. En effet, considérons le faisceau polarisé qui se présente en *ad* comme composé de deux faisceaux polarisés circulairement en sens contraire et d'accord entre eux. S'ils prennent des vitesses différentes en traversant le prisme *ads*, ils éprouveront des réfractions différentes au passage de *ads* dans *asb*, et d'autant plus différentes qu'ils doivent ici changer de rôle, le plus lent devenant le plus rapide, et *vice versa*. Les voilà donc divisés dans tout le trajet de *asb*, et, au passage de ce prisme dans le dernier, *csb*, ils se divisent encore davantage, puisque le plus rapide redevient le plus lent, et *vice versa*. Les deux faisceaux émergents ne sont donc autre chose que les deux faisceaux polarirés circulairement en sens contraire qui composaient le faisceau polarisé incident, et qui ont été séparés par l'inégale vitesse qu'ils ont dû prendre dans les prismes opposés de quartz.

Nous allons en trouver une nouvelle preuve dans une autre expérience que l'on doit encore à l'inépuisable sagacité de Fresnel.

Digitized by Google

Polarisation et dépolarisation produites par des réflexions totales successives. — *abcd* (Pl. 43, Fig. 27) est un parallélipipède de verre dont les angles aigus sont de 54° environ, et les angles obtus par conséquent de 126°. Un faisceau polarisé, entrant perpendiculairement par la face *cb*, éprouve deux réflexions totales en *p* et en *s* sous l'angle de 54° environ, et s'en va ressortir perpendiculairement par la face *ad*. Si le plan de polarisation de ce faisceau fait un angle de 45° avec le plan de la double réflexion, l'on trouve qu'après l'émergence il y a en apparence *dépolarisation* complète, c'est-à-dire que le faisceau analysé avec le prisme bi-réfringent donne dans tous les sens deux images blanches et d'égale intensité.

Cependant la dépolarisation n'est qu'apparente ; ce faisceau n'est pas véritablement un faisceau naturel, il en diffère par deux caractères essentiels :

1° Il reprend sa polarisation dans un plan unique lorsqu'on lui fait subir deux nouvelles réflexions totales sous le même angle, dans un second parallélipipède semblable au premier, quelle que soit la direction du second plan de réflexion par rapport au premier. Si les deux plans coïncident, le nouveau plan de polarisation coïncide avec le premier.

2° En traversant des lames cristallisées, il développe des teintes ayant d'autres caractères et soumises à d'autres lois que celles qui sont données par la lumière naturelle.

Enfin, le faisceau dont il s'agit est *polarisé circulairement ;* il est identique à l'un des faisceaux que nous avons obtenus dans l'expérience précédente avec le triple prisme de quartz. Pour prouver cette identité, il suffit de soumettre à la double réflexion, dans le parallélipipède de verre, les deux faisceaux qui émergent du triple prisme. Chacun d'eux donne alors un faisceau polarisé ; mais pour l'un le plan de polarisation fait 45° *à droite* du plan de réflexion, et pour l'autre 45° *à gauche ;* ce qui montre bien qu'ils sont polarisés circulairement et en sens contraire.

211. Appareil de M. Biot pour observer les phénomènes de polariation rotatoire. — M. Biot a bien voulu me permettre de faire dessiner et de publier ici l'appareil auquel il s'est définitivement arrêté, après avoir, par des essais successifs, modifié et perfectionné les diverses dispositions dont il avait antérieurement fait usage. Cet appareil, construit avec beaucoup de soin et de

précision par M. Bianchi, a été présenté à l'Académie des sciences, dans sa séance du 13 septembre 1847 (voy. *Comptes rendus*, t. XXV, p. 384); il est tout à la fois propre à l'essai industriel des sucres, et aux recherches les plus délicates sur la polarisation rotatoire des liquides, car il permet de les étudier à des températures très-différentes de la température ambiante. Voici ses principales dispositions (Pl. 45, Fig. 20, 21, 22) :

a Support solide de bois, ayant à peu près la forme et la hauteur d'un établi étroit qui serait ouvert dans sa longueur.

b Plaque de fonte, épaisse, et bien dressée, offrant pareillement une fente de trois centimètres qui règne dans toute sa longueur, excepté aux deux extrémités; elle est fixée sur l'établi par quatre vis.

x Polariseur.

y Porte-objet ou support du tube soumis à l'expérience.

z Analyseur.

Le polariseur *x* se compose d'une glace noire *c*, d'un tube *dd'*, terminé à chaque bout par un diaphragme circulaire, et d'une charnière *e*, qui est comme le centre autour duquel tout l'appareil peut tourner, comme nous allons le voir. La glace *c* s'incline plus ou moins, et se met au point, au moyen d'une vis; un petit cadran marque son inclinaison sur l'axe de l'appareil, et par conséquent sur le rayon réfléchi que l'on observe.

L'analyseur *z* se compose d'un cercle divisé *f* dont l'alidade *g* porte le prisme bi-réfringent *h*; une lunette *i* fixée sur l'alidade sert à mieux distinguer les images. Le cercle a deux mouvements, l'un d'inclinaison, au moyen de la charnière *k*, qui sert à le rendre perpendiculaire au rayon, l'autre d'ascension au moyen du tube *l*, qui peut se fixer à une hauteur voulue, mais qui ne tourne pas, parce qu'il porte sur sa longueur un sillon qui l'en empêche. De plus, deux vis perpendiculaires *m* et *n* servent à donner au tube *l*, et par conséquent au cercle, de petits mouvements de correction pour le régler plus sûrement. Le cercle de l'analyseur est vu de face (Fig. 22); le prisme bi-réfringent est de spath d'Islande, il est travaillé sous un angle convenable, ayant sa section principale perpendiculaire aux arêtes; c'est l'image extraordinaire qui est achromatisée.

Le porte-objet *y* se compose d'une cornière ou rigole *o* parfaitement dressée, et de deux règles à charnière *p* et *q*; la seconde lie solidement le porte-objet à l'analyseur, au moyen de la traverse *r*. Ces règles se fixent aisément à la hauteur voulue, et s'arrêtent en même temps sur la plaque de fonte, parce que chacune d'elles passe dans un petit chariot mobile portant deux vis de pression : l'une de ces vis arrête la règle sur son chariot; l'autre arrête le chariot sur la plaque de fonte.

Pour régler l'appareil, il suffit donc de rendre libres les deux règles *p* et *q* et leurs chariots, puis d'élever le porte-objet à la hauteur qui convient à l'observateur; alors on fixe les chariots et les règles; puis on élève l'analyseur, pour que le centre du cercle se trouve à peu près sur l'axe du rayon réfléchi; ensuite on apporte dans la rigole une espèce de compas formé d'une tige et de trois branches dont les extrémités se trouvent sur un plan perpendiculaire à l'axe de la tige, qui est elle-même dans l'axe de l'appareil; alors on incline le cercle jusqu'à ce qu'il touche exactement les trois branches de ce compas; enfin par l'observation même du rayon réfléchi, on corrige, s'il en est besoin, cette première approximation par le mouvement des vis *m* et *n*.

Cela fait, il n'y a plus qu'à poser les tubes pleins de liquide dans la rigole à la place même du compas, pour procéder aux observations.

Enfin, lorsqu'il s'agit d'étudier un liquide à des températures diverses, le tube contenant le liquide se dispose dans l'étuve *t*, représentée en coupe (Fig. 20). Cette étuve porte un agitateur et des thermomètres; elle se chauffe ou au moyen d'un liquide, ou au moyen d'un courant de vapeur; et ses formes sont telles, qu'il suffit d'ôter la rigole *o* pour qu'elle vienne s'adapter exactement sur les règles *p* et *q*, de telle sorte que le rayon réfléchi passe par l'axe du tube.

Indiquons en peu de mots la méthode générale d'observation. La première précaution à prendre est de s'assurer que le rayon incident est complétement polarisé par la glace noire; il faut pour cela que l'une des images s'éteigne pour une certaine position du prisme analyseur; s'il n'en est pas ainsi, la glace est trop ou trop peu inclinée, il faut la régler de nouveau. La seconde précaution est de vérifier le zéro; la section principale doit être indiquée sur la monture du prisme pour empêcher que l'on ne

Digitized by Google

puisse confondre l'image ordinaire avec l'image extraordinaire; on cherche donc la position où l'image extraordinaire s'éteint, alors le zéro de l'alidade doit coïncider avec le zéro du cercle gradué; si cela n'arrive pas il faut soigneusement noter la petite différence pour en tenir compte par addition ou par soustraction, suivant que la substance soumise à l'épreuve est active dans un sens ou dans l'autre. Alors le tube sur lequel on veut agir étant mis en place, on reconnaît de suite s'il contient une substance inactive ou une substance active; dans le premier cas l'image extraordinaire reste éteinte, dans le second cas elle reparaît avec des couleurs diverses. Il faut pour avoir la mesure de cette action employer le verre rouge ou la teinte sensible.

Le verre rouge étant adapté sur le prisme on tourne l'alidade dans le sens convenable pour éteindre de nouveau l'image extraordinaire; le sens du mouvement et l'angle obtenu donnent le sens de l'action et son intensité. Si l'angle était très-grand il pourrait y avoir ambiguïté; un tube de moindre longueur lèverait les doutes. La nuance du verre rouge doit être connue par sa longueur d'onde; mais, en le supposant bien gradué, il n'est pas à l'abri de tout inconvénient; s'il est trop clair il ne donne pas une couleur simple, s'il est trop foncé il absorbe trop de lumière, et l'image extraordinaire reste éteinte pendant que l'alidade tourne de plusieurs degrés; il faut multiplier les expériences pour arriver à une moyenne.

En procédant par la teinte sensible on obtient plus rapidement et plus sûrement des résultats précis; sa longueur d'onde est invariable, comme nous l'avons expliqué plus haut. Cependant elle suppose essentiellement que la dispersion est la même que dans le quartz; car, si le mouvement des plans de polarisation cessait d'être en raison inverse du carré des longueurs d'onde, la recomposition des couleurs dans les images ordinaires et extraordinaires serait soumise à d'autres lois, et il est au moins présumable que la teinte qui remplacerait la teinte sensible n'en aurait plus les caractères. Or, dans la multitude des substances actives, M. Biot n'en a trouvé qu'une, une seule, dont la dispersion échappe à la loi commune : c'est l'acide tartrique en dissolution dans l'eau; et, chose bien remarquable, cet acide rentre dans la loi, aussitôt qu'il se combine avec une base énergique, ou même avec l'acide borique. Toutes les mesures relatives à l'acide tartrique exigent donc l'emploi du verre rouge; il en est

Digitized by Google

de même de certaines substances qui ne peuvent pas être complétement décolorées.

212. Comparaison des pouvoirs rotatoires. — M. Biot a traité cette question d'une manière complète (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. X et XI); c'est un travail d'ensemble dont je ne puis pas donner ici un extrait; je dois essayer seulement de faire comprendre les principes sur lesquels il repose.

1° Concevons un liquide homogène dont toutes les parties soient également actives sur la lumière polarisée; soient δ sa densité, α la déviation qu'elle a donnée avec une lumière simple, le rouge ou le jaune, lorsqu'on l'a observée dans un tube de longueur l; soit ρ la déviation qu'elle produirait si l'on pouvait l'observer avec la même lumière, dans un tube d'une longueur 1, et après avoir idéalement changé sa densité pour l'amener à être aussi égale à 1, sans modifier en aucune sorte son action spécifique.

Pour la densité 1 son action étant ρ, pour la densité δ elle sera $\rho\delta$ proportionnellement à la quantité de matière active contenue dans l'unité de volume; comme de plus elle est proportionnelle à la longueur, elle deviendra $\rho\delta l$ pour la longueur l; or on a trouvé cette déviation égale à α, on a donc

$$\rho\delta l = \alpha \quad \text{et} \quad \rho = \frac{\alpha}{\delta l}.$$

Cette valeur de ρ qui, dans la même substance, ne doit changer ni avec δ ni avec l, est le *pouvoir rotatoire moléculaire* ou *spécifique de cette substance.*

On peut donc comparer ainsi les pouvoirs rotatoires spécifiques des divers liquides homogènes, comme l'essence de térébenthine, l'essence de citron, l'essence de laurier, etc., dont les actions ne paraissent pas dépendre d'une substance active qu'elles tiendraient en dissolution, mais bien de leurs molécules propres et constitutives. Il restera à examiner si les pressions mécaniques, les dilatations par la chaleur, ou d'autres causes modifient ce pouvoir spécifique. Pour l'essence de térébenthine, M. Biot a reconnu que les changements de température ne modifient pas son pouvoir spécifique quand on tient compte des changements de densité qu'ils produisent.

2° Supposons que l'on dissolve une substance active dans un liquide inactif, par exemple, du camphre dans l'alcool, du sucre dans l'eau, de la dextrine, de la gomme, de la glucose, de

Digitized by Google

l'asparagine, de l'acide aspartique, malique, etc.; comment pourrait-on comparer les pouvoirs rotatoires de ces diverses substances, qui ne peuvent pas être observées à l'état solide et qui doivent forcément être diluées et étendues dans des liquides pour être soumises à l'épreuve?

Soient p le poids de substance active,
ϖ le poids du dissolvant inactif,
δ la densité de la dissolution,
l la longueur du tube dans lequel on l'observe,
α la déviation qu'elle produit sur la lumière prise pour type,
ρ son pouvoir rotatoire, c'est-à-dire la déviation qu'elle produirait sur la même lumière, si l'on pouvait l'observer isolément à travers l'unité d'épaisseur et sous une densité égale à 1.

Le poids $p+\varpi$ de la dissolution contenant un poids p de matière active, l'unité de poids contient $\frac{p}{p+\varpi}$; l'unité de volume contient δ unités de poids et par conséquent une quantité de matière active $\frac{\delta p}{p+\varpi}$; la rotation ρ doit augmenter proportionnellement à la longueur l et à la quantité de matière active contenue dans l'unité de volume, elle devient donc $\frac{\rho\delta pl}{p+\varpi}$; cette rotation a été trouvée égale à α, ainsi on a

$$\frac{\rho\delta pl}{p+\varpi}=\alpha, \quad \text{d'où } \rho=\frac{\alpha(p+\varpi)}{\delta pl}.$$

Si les substances actives qui se dissolvent conservent en effet un pouvoir rotatoire spécifique, il faut que pour chacune d'elles la valeur de ρ soit constante et indépendante des qualités variables p, ϖ, l et δ. Or, M. Biot a démontré par un grand nombre d'expériences délicates que tous les phénomènes sont en général conformes à ce principe fondamental, aussi longtemps du moins que la structure moléculaire n'est pas détruite, et que les actions chimiques, malgré leur énergie, laissent au groupe moléculaire actif sa constitution primitive.

Il y a cependant des exceptions remarquables, par exemple, le pouvoir de l'acide tartrique change avec la quantité d'eau qui sert à le dissoudre, et avec la température de la dissolution; le

Digitized by Google

pouvoir du sucre de canne interverti par les acides diminue rapidement à mesure que la température s'élève; cependant pour chaque température il reste à peu près fixe et indépendant des variables p, ϖ, l et δ.

Mais dans le cas général on voit que la détermination du pouvoir rotatoire se réduit à prendre un poids p de substance active, à le dissoudre dans un poids ou dans un volume d'eau connu, car le poids se déduira du volume par la table des dilatations (t. I, n° **140**), à trouver la densité δ de la dissolution, et enfin à observer la déviation α dans un tube de longueur l; alors, ρ étant connu, on pourra s'en servir pour calculer d'avance la déviation α' que l'on doit obtenir avec la même substance, dans une autre dissolution de densité δ' qui en contient un poids p' sur ϖ' d'eau, lorsqu'on l'observera dans un tube de longueur l': car on aura

$$\alpha' = \rho l' \frac{\delta' p'}{p' + \varpi'}.$$

Pour certains corps la densité δ' pourra se déduire de p' et de ϖ', et l'on sera dispensé de la chercher; mais pour le sucre, par exemple, cela n'arrive pas, la densité des cristaux de sucre déterminée directement par M. Biot est 1,58933 (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. X, p. 315), et en partant de cette donnée pour calculer les densités des diverses dissolutions on les trouve toujours plus faibles que les densités observées, et d'autant plus faibles que la dissolution est plus étendue.

3° On a deux dissolutions actives de densités δ, δ' qui donnent des déviations α, α' quand on les observe avec un tube de longueur λ, trouver la déviation a qui sera observée avec un tube de longueur l dans un mélange de densité d, composé d'un poids p de la première et d'un poids p' de la seconde.

Dans ce mélange l'effet total doit être la somme des effets partiels, ceux-ci étant respectivement

$$\frac{\alpha}{\delta\lambda} \cdot \frac{pdl}{p+p'} \quad \text{et} \quad \frac{\alpha'}{\delta'\lambda} \cdot \frac{p'dl}{p+p'},$$

il en résulte

$$\frac{\alpha}{\delta\lambda} \cdot \frac{pdl}{p+p'} + \frac{\alpha'}{\delta'\lambda} \cdot \frac{p'dl}{p+p'} = a,$$

ou

$$\frac{\alpha p}{\delta} + \frac{\alpha' p'}{\delta'} = a \frac{(p+p')}{d} \cdot \frac{\lambda}{l}.$$

Digitized by Google

Si l'on veut, par exemple, que les deux dissolutions se compensent et donnent un effet nul, on aura pour condition

$$\frac{\alpha}{\alpha'} = -\frac{\delta p'}{\delta' p} = -\frac{v'}{v},$$

c'est-à-dire que les dissolutions doivent agir en sens inverse et qu'il faut en prendre des volumes v et v', qui soient en raison inverse de leurs rotations α et α'.

M. Biot a vérifié cette déduction en opérant sur deux dissolutions sucrées : l'une de sucre de canne, qui, observée par la teinte sensible, donnait une déviation à droite de 52°,46 dans un tube de 146^{mm},25; l'autre de sirop de ce même sucre, interverti par l'acide chlorhydrique, et rendu incristallisable, contenant de plus le chlorure de calcium qui s'était formé en neutralisant l'acide avec du marbre; celle-ci donnait une déviation à gauche de—25°,33 dans un tube égal de 146^{mm},25, et observée pareillement par la teinte sensible. Le rapport de ces deux déviations était 2,07, et en prenant des volumes 100 de la première et 207 de la seconde, le mélange s'est trouvé en effet parfaitement neutre (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. X); du moins pour la température de l'expérience, car, en le chauffant il aurait sans doute donné une déviation à droite, et en le refroidissant une déviation à gauche, puisque le pouvoir du sucre interverti s'affaiblit tellement par la chaleur qu'à 35° il n'est plus que les $\frac{2}{3}$ environ de ce qu'il est à 10°.

215. Expériences de M. Pasteur sur la corrélation qui existe entre la forme cristalline et les propriétés optiques. — M. Biot avait établi les lois remarquables de la polarisation rotatoire dans l'acide tartrique, et montré que cet acide porte avec lui ses propriétés optiques dans la plupart des sels qu'il forme ; M. Mitscherlich avait signalé le tartrate double de soude et d'ammoniaque, qui est actif sur la lumière, et le paratartrate correspondant qui est inactif, bien que ces deux sels fussent identiques, au moins en apparence, pour la composition chimique, la forme cristallographique et toutes les autres propriétés M. Pasteur, avec une rare sagacité, a trouvé le caractère distinctif de ces deux sels, et cette observation fondamentale jette un nouveau jour sur la structure moléculaire des corps. En examinant avec attention les divers tartrates cristallisés, il a reconnu d'abord que leurs formes peuvent être dérivées de prismes

Digitized by Google

droits ou très-peu obliques, à base rectangle; mais il a reconnu surtout de petites facettes, dérogeant à la loi de symétrie de Haüy et qui, placées d'une manière dissymétrique sur les deux bases, forment ce qu'on appelle une *hémiédrie;* pour un observateur, tenant le cristal d'une certaine façon bien définie, l'hémiédrie est à *droite*. Les paratartrates simples n'offrent rien de pareil; cependant M. Pasteur, ayant fait cristalliser avec les précautions convenables le paratartrate double de soude et d'ammoniaque, parvint à saisir quelques cristaux isolés qui avaient aussi le caractère hémiédrique, mais qui le présentaient, les uns à *gauche*, les autres à droite comme les tartrates. Alors, ayant fait dissoudre séparément les cristaux hémiédriques à droite et les cristaux hémiédriques à gauche pour chercher si ces dissolutions n'auraient pas quelque pouvoir rotatoire, il eut la satisfaction de voir qu'elles faisaient tourner énergiquement le plan de polarisation et qu'elles le faisaient tourner en sens contraire, les cristaux hémiédriques de droite le portant à droite et les cristaux hémiédriques de gauche le portant à gauche, avec une énergie pareille (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXIV, page 442, année 1848). Quelle différence peut-il y avoir entre ces deux sortes de cristaux, formés simultanément dans une même dissolution primitive de paratartrate double de soude et d'ammoniaque? L'observation la plus attentive, l'analyse chimique la plus exacte ne peuvent en révéler aucune; même substance, même forme générale, mêmes propriétés à tous égards; la seule différence perceptible est dans ce détail de la forme cristallographique, dans ces facettes hémiédriques qui se trouvent placées, ici à droite, là à gauche; rappelant ainsi l'ancienne observation de M. Herschel sur le cristal de roche.

On sait que l'acide paratartrique, connu d'abord vers 1819 sous le nom d'acide racémique, a été obtenu en grande quantité par M. Kestner, habile fabricant de Thann; produit accidentel, résultant du traitement des tartres déposés par le vin des Vosges et que M. Kestner lui-même n'a pas pu obtenir de nouveau. Cependant il en avait conservé, et, par zèle pour la science, il s'est empressé d'en donner à M. Pasteur autant qu'il lui en a fallu pour ses expériences (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXVIII, p. 56). Je regrette de ne pouvoir donner ici que quelques-unes des conclusions de ce travail, non moins remarquable par l'excellente méthode expérimentale que par la nouveauté des

Digitized by Google

faits. M. Pasteur, après avoir saturé des poids égaux d'acide paratartrique, l'un avec la soude, l'autre avec l'ammoniaque, et mêlé les liqueurs neutres, a obtenu par refroidissement ou par évaporation spontanée, de nombreux et grands cristaux de paratartrate double de soude et d'ammoniaque, ayant les caractères et les propriétés dont nous venons de parler. Ajoutons que les cristaux hémiédriques à droite, tirés de cette dissolution première, dissous et redissous à part un grand nombre de fois, ne donnent jamais par la cristallisation de cristaux hémiédriques à gauche ; réciproquement, ceux-ci, traités de même, ne donnent jamais trace des premiers. Ainsi, quant à la forme, ce sont deux substances distinctes ; cependant il est peu probable qu'elles existent séparément dans la dissolution primitive, car elles pourraient alors se précipiter par la cristallisation en proportions un peu différentes, et l'eau mère exercerait une action sur la lumière, ce qu'on n'observe jamais. M. Pasteur a isolé les acides de ces deux sels doubles, en assez grande quantité pour les soumettre à toutes les expériences ; les cristaux hémiédriques de droite lui ont donné un acide dont il a constaté la parfaite identité avec l'acide tartrique ordinaire ; les cristaux hémiédriques de gauche lui ont donné un *autre acide*, de *même composition* que l'acide tartrique, mais exerçant à gauche sur le rayon polarisé les mêmes actions que l'acide tartrique exerce à droite. Il en résulte donc que l'acide paratartrique est composé de deux acides, savoir : l'ancien acide tartrique que nous appellerons *acide tartrique droit ;* et le nouvel acide isolé par M. Pasteur, que nous appellerons *acide tartrique gauche*.

Ces deux acides peuvent-ils synthétiquement reproduire l'acide paratartrique ? C'est une question que M. Pasteur a aussi résolue ; et, chose digne de remarque, c'est par une action chimique assez vive et avec dégagement sensible de chaleur que l'acide paratartrique ou racémique se forme lorsqu'on mêle deux dissolutions concentrées d'acide tartrique droit et d'acide tartrique gauche. Le mélange se prend en masse, et il suffit de redissoudre pour avoir de très-beaux cristaux, identiques à tous égards à ceux de l'acide paratartrique primitif.

M. Pasteur a étudié, dans leur composition et dans leurs propriétés optiques, tous les sels formés par l'acide tartrique gauche, et il a constaté dans tous les cas, entre ces produits et les produits analogues de l'acide droit, la parfaite identité chimique

Digitized by Google

ainsi que la constante opposition des formes cristallographiques et des propriétés optiques. Jusqu'à présent, il n'a pas pu réussir à faire passer l'un de ces deux acides de l'état droit à l'état gauche, ou *vice versa*.

Guidé par cette méthode qui a pour base des différences cristallographiques si essentielles, bien qu'elles n'aient rien de frappant pour les yeux qui s'arrêtent à l'aspect général des formes géométriques, M. Pasteur a été conduit à reconnaître les propriétés optiques dans l'asparagine, dans l'acide aspartique qui s'en dérive directement par l'action des alcalis, et aussi dans l'acide malique naturel (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXI et XXXIV, ann. 1851 et 1852). Presque en même temps, M. Dessaigne, de Vendôme, tirait du fumarate d'ammoniaque un acide aspartique qui devait, par son origine même, se distinguer optiquement de l'acide aspartique précédent, bien qu'il lui fût à peu près identique par toutes ses autres propriétés; M. Pasteur a constaté en effet que cet acide est *inactif* sur le rayon polarisé. Ce résultat curieux soulevait une autre question : M. Piria ayant fait voir que par l'action de l'acide nitrique nitreux sur l'acide aspartique on peut former l'acide malique ordinaire, que doit-il arriver ici? Les deux acides aspartiques donneront-ils le même acide malique? M. Pasteur a répondu à cette question en démontrant que l'acide *aspartique inactif* donne un acide *malique inactif*, ayant d'ailleurs la même composition et des propriétés très-analogues; ainsi, il y a deux acides tartriques opposés, deux acides aspartiques différents qui impriment chacun leur caractère distinctif aux deux acides maliques qui s'en dérivent. Ces expériences viennent confirmer d'une manière remarquable les résultats si importants et si variés que M. Biot avait obtenus, et dont il s'était servi avec tant de succès pour montrer que la polarisation rotatoire est aujourd'hui le moyen le plus puissant qui nous soit donné pour pénétrer dans la structure moléculaire des composés chimiques.

214. Appareil à compensateur de M. Soleil pour observer la polarisation rotatoire. — Quelques personnes ont, je crois, fort exagéré les avantages de cet appareil et les services qu'il pourrait rendre pour la perception des droits sur le sucre; ces exagérations, cependant, ne doivent rien ôter à son mérite intrinsèque; il a des qualités qui lui sont propres et qui en font un

Digitized by Google

instrument précieux pour plusieurs recherches. Nous allons, en peu de mots, indiquer sa construction (Pl. 45, Fig. 4, 5, 6, 7, 8).

La figure 4 le représente dans son ensemble.

La figure 5 représente à part, sur la ligne xy, prise pour axe optique de l'instrument, la coupe verticale de toutes les pièces qui agissent sur la lumière; les lignes ponctuées les reportent à la place qu'elles occupent en réalité dans le corps de l'appareil. On y distingue trois prismes polarisants, a, b, c, et quatre lames de quartz, g, h, i, k, toutes perpendiculaires à l'axe.

a, prisme de Nicol, polarisant le faisceau incident, qui vient en général d'une lampe de Carcel, munie de son globe et placée à une hauteur convenable.

g, plaque de quartz de 3 ou 4 millimètres d'épaisseur.

Ces deux pièces composent le *système éclairant;* elles pourraient n'y être pas, ou être placées ailleurs; elles n'entrent dans la composition de l'instrument que comme un verre coloré qui donnerait une nuance convenable.

b, polariseur, prisme biréfringent achromatisé; il ne donne qu'une image, les diaphragmes arrêtent l'autre; admettons que celle qui passe soit polarisée dans le plan vertical; sa couleur dépend de la position du prisme de Nicol; en le tournant à droite ou à gauche, on lui donne des nuances diverses parmi lesquelles il faut choisir celle qui convient d'après la coloration du liquide soumis à l'épreuve.

h, *plaque à deux rotations;* elle est représentée à part (Fig. 6) et sur une plus grande échelle; ses deux moitiés d et d' sont de même épaisseur; mais l'une d' a été tirée d'un cristal tournant à gauche, et l'autre d, d'un cristal tournant à droite. Ainsi, en la traversant, le faisceau polarisé est coupé en deux; dans l'une, les plans de polarisation sont dispersés à droite; dans l'autre, ils sont dispersés à gauche et de la même quantité pour chaque couleur.

Le liquide contenu dans le tube m (Fig. 4) agit comme une lame de quartz d'une épaisseur inconnue x, qui serait, par exemple, *positive* ou tournant à droite; son effet s'ajoute donc à celui de la plaque de droite et se retranche de celui de la plaque de gauche. Le principe de l'appareil consiste à détruire cet effet, ou plutôt à le compenser; pour cela il faut mettre à la suite du tube une lame de quartz de même épaisseur x, mais d'une action in-

verse; c'est là ce qui constitue le compensateur qui est composé d'une lame fixe *i* et de deux lames mobiles *k*.

i et *k* formant *compensateur*, ces deux lames tournent essentiellement en sens contraire l'une de l'autre. Admettons que *i* tourne à droite et que son épaisseur soit de 3 millimètres; alors *k* tourne à gauche, mais son épaisseur est variable : on peut lui donner à volonté toutes les épaisseurs comprises entre 3 et 4; donnez-lui 3, elle détruit juste l'effet de *i*; donnez-lui $3+x$, elle détruit l'effet de *i* et l'effet du liquide contenu dans le tube qui est représenté par l'épaisseur x d'une lame à droite; donnez-lui $3-x$, elle détruira l'effet de *i* et celui d'un liquide contenu dans le tube ayant une action à gauche équivalente à une épaisseur x de quartz. Le compensateur pourra ainsi détruire l'effet de toutes les substances contenues dans le tube, qu'elles tournent à droite ou à gauche, pourvu que l'intensité de leur action ne dépasse pas celle de 1 millimètre de quartz. On pourrait un peu étendre ces limites du compensateur, mais à 1 millimètre ou 1 millimètre et $\frac{1}{4}$ de part et d'autre elles sont en général suffisantes.

Pour obtenir ces effets, la lame *k* est composée de deux quartz un peu prismatiques *abc* et *def* (Fig. 7), exactement de même angle tournant dans le même sens, ayant leurs faces *ab* et *de* perpendiculaires à l'axe. Tout se réduit alors à les faire glisser l'une devant l'autre, pour augmenter ou diminuer l'ensemble de leur épaisseur; cet effet s'obtient par un pignon qui engrène à la fois dans les crémaillères des montures de chaque lame (Fig. 8); au moyen d'échelles divisées que portent ces montures, on lit l'étendue du mouvement qu'il a fallu donner aux lames, et la graduation est faite pour que l'on puisse en déduire l'épaisseur de quartz qui compense la substance soumise à l'épreuve.

c, *analyseur*, prisme bi-réfringent tout à fait semblable à celui de l'appareil de M. Biot, ne laissant passer que l'image extraordinaire; seulement il est fixe, et l'une des conditions d'exactitude est ici d'empêcher qu'il ne puisse se mouvoir lorsqu'on l'a placé dans l'azimut qu'il doit avoir.

La détermination de cet azimut est un point important et délicat; puisque le compensateur détruit l'effet du liquide soumis à l'épreuve, il faut avoir dans les deux moitiés du faisceau, tel qu'il sort de la plaque à deux rotations, des images faciles à reconnaître et qui se contrôlent l'une par l'autre; rien n'est plus simple et plus rigoureux que de les prendre égales pour la nuance

Digitized by Google

et l'intensité. Cette condition serait toujours remplie en plaçant l'analyseur dans le plan de polarisation primitive. Mais en se bornant à cette précaution, l'appareil serait mauvais, les teintes paraîtraient encore égales, lorsqu'on déplacerait le compensateur de plusieurs degrés. Il faut donc choisir une nuance plus favorable, et il n'y en a pas deux, il faut choisir la teinte sensible. Ces deux conditions réunies exigent que la plaque à deux rotations ait une épaisseur déterminée, ou $3^{mm},75$ ou $7^{mm},50$. Dans le premier cas (PL. 44, FIG. 16), l'analyseur doit avoir sa section principale à 90° du plan primitif de polarisation ; dans le deuxième cas (FIG. 17), la section principale doit être dans le plan de polarisation lui-même. Alors le tube et le compensateur étant enlevés, l'analyseur fait voir la teinte sensible exactement pareille sur les deux moitiés de la plaque; replacez maintenant le tube et le compensateur, vous retrouverez la teinte sensible, si la compensation est parfaite, mais s'il y manque quelque chose, la teinte sensible de l'une des moitiés aura marché dans un sens vers le rouge; tandis que l'autre moitié aura marché en sens contraire vers le bleu; l'œil sera frappé du contraste.

L'idée de colorer le faisceau par le prisme de Nicol *a* et la plaque de quartz *g* est ingénieuse; cependant elle ne peut conduire qu'à une approximation, qui permet quelquefois des écarts assez considérables.

J'ai eu l'occasion de m'assurer, dans de très-nombreuses séries d'expériences faites simultanément, par une réunion d'habiles observateurs, que, dans l'essai des sucres bruts de meilleure qualité, les erreurs sur la quantité de sucre cristallisable peuvent rester comprises entre 2 et 3 pour 100.

215. Polarisation rotatoire des rayons obliques. — Dans ce qui précède, nous n'avons considéré que les rayons qui traversent le cristal dans le sens de l'axe; mais lorsqu'on dispose les expériences pour recevoir à la fois les rayons perpendiculaires et les rayons obliques, en procédant exactement comme dans l'observation des anneaux que présentent les cristaux à un axe ou à deux axes, on voit aussi dans le cristal de roche, soit à la lumière des nuées, soit à la lumière solaire, de beaux systèmes d'anneaux très-vifs et très-développés : seulement la croix noire a disparu au centre, elle est remplacée par le cercle coloré qui résulte de la polarisation circulaire : on remarque même que la croix noire qui coupe les premiers anneaux est bien moins ca-

Digitized by Google

ractérisés, ce qui indique qu'il y a là encore une influence de la polarisation circulaire ou plutôt elliptique, comme M. Airy l'a en effet démontré (*Trans. de Cambridge*, 1832). Cependant il reste d'intéressantes observations à faire pour lier théoriquement tous ces phénomènes de coloration.

M. Airy a pareillement fait voir que, si l'on superpose deux plaques de même teinte et de même épaisseur, dont l'une tourne à droite et l'autre à gauche, les effets ne sont pas détruits en totalité, mais partiellement, ce qui donne naissance à des *spires* d'une forme particulière (Pl. 44, Fig. 11). M. Noremberg avait aussi observé ces spires, et son appareil les produit d'une manière remarquable avec un *seul* cristal posé sur le miroir *m*, lorsqu'on présente au-dessus du cristal une loupe à une distance à peu près égale à sa distance focale. Dans ce cas, les spires résultent de l'interférence des rayons qui ont traversé le cristal une première fois avant d'arriver au miroir, et de ceux qui le traversent une seconde fois après la réflexion, et qui se comportent par conséquent comme si le cristal tournait en sens contraire.

Ces spires peuvent être projetées sur un tableau comme les couleurs du quartz perpendiculaire à l'axe.

216. Expériences de M. Jamin sur la polarisation elliptique que prennent les rayons polarisés en se réfléchissant sur les milieux transparents. —Pour faire ces recherches importantes et très-délicates, M. Jamin a imaginé l'appareil suivant (Pl. 45, Fig. 1, 2, 3) :

a (Fig. 3), cercle horizontal;

b, alidade qui se meut sur le cercle, portant une plate-forme destinée à recevoir la substance que l'on veut étudier; celle-ci forme un réflecteur plan et poli que l'on dispose verticalement sur le centre;

cd, tube d'incidence; il est horizontal, fixé au limbe du cercle *a*, et dirigé sur la verticale du centre; il contient un large prisme de Nicol pour polariser le rayon solaire qu'il reçoit d'un héliostat;

c'd', cercle vertical, donnant l'azimut du plan de polarisation du rayon incident;

ef, tube de réflexion; il est horizontal, mobile sur le limbe du cercle *a*, et dirigé sur la verticale du centre; il

porte aussi un large prisme de Nicol, et de plus un micromètre particulier;

ef cercle vertical, donnant l'azimut du plan de polarisation du rayon réfléchi, lorsqu'il est polarisé rectilignement.

Toutes ces pièces sont disposées avec précision pour que l'expérimentateur, en mettant l'œil en *f*, puisse observer directement le rayon réfléchi, lorsque les tubes et le réflecteur central ont reçu les directions convenables.

C'est par erreur que la figure 3 fait voir le micromètre *m* à l'extrémité *c* du tube *cd*; il doit être en *e* à l'extrémité du tube *ef*.

Ce micromètre compensateur est représenté dans les figures 1 et 2; (Fig. 1) coupe par un plan horizontal, (Fig. 2) élévation; il se compose de deux lames de quartz un peu prismatiques *ghi* et *gki* à *axes croisés*, l'une ayant son axe parallèle à *gh*, l'autre ayant son axe perpendiculaire au plan *gki*; celle-ci est fixée sur la monture, l'autre est mobile au moyen de la vis *v* qui porte une tête divisée *t* (Fig. 3). Ainsi, l'on peut faire à volonté que le rayon réfléchi qui traverse ce système perpendiculairement dans la direction *xy* de l'axe du tube *ef*, traverse des épaisseurs égales de chaque lame ou des épaisseurs inégales; deux traits au diamant *nn'* tracés de chaque côté du centre ou de l'axe et distants de 1 millimètre environ circonscrivent l'espace où se doit faire l'observation. Les lames sont d'ailleurs assez peu prismatiques, pour qu'un déplacement d'environ 6 millimètres donné par douze tours de la tête de la vis ne produise dans les lames qu'une différence d'épaisseur correspondant à une différence de marche d'une demi-longueur d'onde ou à $\frac{\lambda}{2}$, soit d ce déplacement exact qui correspond à $\frac{\lambda}{2}$, un autre déplacement d' correspond par conséquent à une différence de marche a donnée par la relation

$$a = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{d'}{d}.$$

Cela posé, voici l'usage du micromètre.

Un rayon polarisé par le prisme du premier tube *cd* est éteint par le prisme oculaire du deuxième tube *ef*; on place le micromètre en tournant ses axes à 45° du plan de polarisation, les

lames ayant une épaisseur égale entre les deux traits de repère; il n'y aura aucune inégalité de marche, et l'on distinguera sur la ligne médiane une frange obscure parfaitement marquée.

On fait tourner la vis pour augmenter, par exemple, l'épaisseur de la lame mobile, alors les deux rayons ordinaire et extraordinaire qui se forment dans la première lame et qui passent dans la seconde en changeant de rôle, prennent une différence de marche croissante qui s'élève bientôt à $\frac{\lambda}{2}$. Quand cette limite est atteinte, la lumière est ramenée à la polarisation rectiligne dans un azimut de — 45°, et en tournant de 90° le prisme oculaire on retrouve une frange obscure rigoureusement comprise entre les repères.

Avec la lumière homogène les franges sont minces, noires, et faciles à observer; mais lorsqu'on a acquis l'habitude de ces expériences on peut employer aussi la lumière blanche.

Supposons maintenant que, sous certaines conditions, la substance réfléchissante qui est au centre de l'appareil, exerce sur le rayon polarisé qu'elle reçoit, une action telle que les vibrations parallèles et perpendiculaires au plan de réflexion ne restent pas d'accord, qu'il en résulte un retard ou une avance de l'une sur l'autre; alors par le mouvement de la vis le micromètre deviendra compensateur, il pourra donner de l'avance à celle que la réflexion a retardée, et *vice versa;* ou du moins il pourra réduire la différence de marche à être exactement d'un nombre juste de demi-longueurs d'onde, afin que le rayon ramené en définitive à la polarisation rectiligne puisse être éteint par le prisme oculaire, et puisse faire paraître la frange noire entre les deux repères.

C'est ainsi que M. Jamin a constaté ce phénomène curieux et démontré qu'en effet, toutes les substances transparentes, solides ou liquides, donnent la polarisation elliptique au rayon polarisé qui se réfléchit sur elles, car elles impriment un certain retard, tantôt à la vibration qui s'accomplit dans le plan de réflexion, tantôt à celle qui s'accomplit dans le plan perpendiculaire.

M. Jamin appelle *substances à réflexion positive* celles qui, comme l'opale et le diamant, donnent de l'avance à la vibration de la composante polarisée dans le plan d'incidence; *substances à réflexion négative* celles qui, comme l'hyalite et la

fluorine, lui donnent au contraire du retard ; et *substances neutres* celles qui ne donnent ni avance ni retard, laissant ainsi au rayon sa polarisation toujours rectiligne.

Un appareil analogue à celui que nous venons de décrire, mais disposé pour étudier la réflexion sur la surface horizontale des liquides, lui a permis de donner une grande extension à ses recherches. On trouvera dans ses deux mémoires sur ce sujet (*Ann. de Chim. et de Phy.*, t. XXIX, ann. 1850, et t. XXXI, ann. 1851), une centaine de substances tant solides que liquides qu'il a soumises aux épreuves les plus complètes, et pour lesquelles il a déterminé, par des mesures précises, tous les éléments du phénomène dont il s'agit, savoir : l'angle de polarisation maximum, les rapports d'amplitude des deux vibrations principales, la valeur et le sens de l'*anomalie* ou du coefficient d'ellipticité, en y ajoutant souvent une détermination directe et indirecte de l'indice de réfraction. Nous ne pouvons indiquer ici que les principales conclusions de ce grand travail qui touche aux points les plus essentiels et les plus délicats de la théorie de la lumière.

1° Dans la réflexion d'un rayon polarisé il y a toujours une différence de phase entre les deux composantes principales du mouvement réfléchi ; cette différence est de $\frac{\lambda}{2}$ sous l'incidence normale, de $\frac{3\lambda}{4}$ sous l'incidence principale ou de polarisation maximum, de λ sous l'incidence rasante.

2° Les substances qui ont un indice de réfraction supérieur à 1,40 sont *positives ;* les différences de phase $\frac{\lambda}{2}$ et λ se soutiennent sans variation sensible jusqu'à une distance plus ou moins grande de l'incidence principale ; ainsi la polarisation elliptique s'étend plus ou moins de part et d'autre de cette incidence ; cependant son étendue n'est pas toujours en rapport avec la valeur de l'indice de réfraction.

3° Les substances qui ont un indice inférieur à 1,40 sont *négatives ;* elles donnent, en général, la polarisation elliptique dans des limites plus restreintes que les précédentes.

4° Les substances dont l'indice est plus ou moins voisin de 1,40 sont *neutres ;* les différences de phase $\frac{\lambda}{2}$ et λ se soutiennent jusqu'à l'incidence principale où elles semblent passer brus-

quement à $\frac{3\lambda}{4}$; les rayons polarisés qui se réfléchissent sur ces substances, conservent donc sous toutes les incidences leur polarisation rectiligne.

Les formules que M. Cauchy a tirées de sa théorie générale, si belle et si complète, des mouvements vibratoires de la lumière, reçoivent une confirmation remarquable des expériences dont nous venons de parler; il est certain maintenant que ces formules représentent les phénomènes avec une fidélité mathématique, mais il est certain aussi que les coefficients par lesquels elles diffèrent, en quelques points, des formules de Fresnel, ont toujours des valeurs si petites que ce n'est que par des expériences d'une extrême délicatesse que l'on parvient quelquefois à les rendre sensibles.

§ 2. — *Polarisation rotatoire magnétique.*

217. A la fin de 1845, M. Faraday a fait connaître un fait nouveau dans la science : il a démontré que plusieurs corps diaphanes, solides ou liquides, soumis d'une certaine manière à l'action des fluides électriques et magnétiques, acquièrent la propriété d'imprimer des modifications nouvelles à la lumière polarisée qui les traverse. Ces corps deviennent *photogyres*, c'est-à-dire qu'ils sont alors capables de faire tourner la lumière, ou, ce qui revient au même, de faire tourner les plans de vibration de la lumière qui se propage dans leur intérieur. Ainsi la découverte de M. Faraday établit pour la première fois un rapport, une dépendance plus ou moins intime, entre deux genres de forces qui jusque-là paraissaient absolument distinctes et indépendantes, savoir : les forces qui produisent les ondes lumineuses et celles qui produisent les courants électriques ou les phénomènes magnétiques.

Je vais essayer d'exposer rapidement les principales expériences qui ont été faites sur ce sujet; je les emprunterai aux mémoires de M. Faraday, à la note que j'ai présentée à l'Académie des sciences, le 26 janvier 1846, et aux autres publications qui sont venues à ma connaissance.

Un morceau de flint-glass pesant (Pl. 45, Fig. 23), terminé par deux faces planes et parallèles a', b', est disposé, devant un électro-aimant puissant, comme s'il devait lui servir d'armature. Lorsqu'on fait passer un courant énergique, comme celui qui

Digitized by Google

résulte d'une pile de 50 paires de Bunsen, la pièce de flint n'éprouve aucun effet mécanique sensible ; elle n'est ni attirée vers les pôles, ni repoussée, ni tournée dans une direction particulière ; mais si l'on fait tomber sur elle, perpendiculairement à ses faces *a'* et *b'*, un rayon polarisé, elle agit sur lui, quand le courant passe, autrement qu'elle ne ferait si le courant ne passait pas. En effet, si ce rayon est reçu à son émergence sur un prisme de Nicol ou sur un prisme bi-réfringent, disposé pour ne donner d'abord qu'une image, on voit qu'à l'instant où le courant passe dans l'électro-aimant, la seconde image paraît, qu'elle persiste aussi longtemps que le courant lui-même, et qu'elle disparaît à l'instant où il cesse. Pour rendre l'expérience plus frappante, il est bon d'établir sur le passage du courant un commutateur au moyen duquel on puisse rapidement établir ou supprimer les communications. Alors on voit la seconde image paraître avec le courant, disparaître avec lui, et les alternatives de lumière et de ténèbres sont plus faciles à saisir quand elles ont lieu à des instants convenablement rapprochés.

Le flint reçoit donc de l'électro-aimant une propriété nouvelle ; il devient capable ou de produire une polarisation partielle, ou de faire tourner les plans de polarisation.

Pour constater que c'est ce dernier effet qui est produit, il suffit de remarquer qu'en tournant un peu le prisme analyseur, ou à droite ou à gauche, il y a un de ces deux mouvements pour lequel l'image produite par le courant disparaît si l'on opère avec de la lumière homogène, et tend à disparaître si l'on opère avec de la lumière blanche ; car, dans ce cas, elle passe par diverses teintes qui montent graduellement de l'extrémité la plus réfrangible à l'extrémité la moins réfrangible du spectre. Ainsi, sous l'influence de l'aimant, le flint devient capable d'exercer une action analogue à celle du quartz perpendiculaire à l'axe, de faire tourner inégalement les plans de polarisation des diverses couleurs, et de les faire tourner d'autant plus, que les couleurs sont plus réfrangibles.

Il y a plus, le sens de la rotation dépend du sens du courant ; car, en faisant passer le courant successivement dans un sens et dans l'autre, on reconnaît qu'il faut aussi faire tourner la section principale du prisme analyseur dans des sens opposés, pour obtenir les mêmes effets d'extinction ou de coloration.

Enfin, pour fixer d'une manière absolue le sens du mouve-

ment des plans de polarisation, par rapport à la direction du courant, nous dirons que *les plans de polarisation tournent dans le même sens que le courant*. En effet, a et b étant le pôle austral et le pôle boréal de l'électro-aimant, le flint, considéré comme une armature, ou comme un corps magnétisé par influence, aurait deux pôles et un axe magnétique ; son pôle austral serait en a', son pôle boréal en b', et son axe magnétique parallèle à la ligne $a'b'$. C'est-à-dire que, pour l'observateur qui regarde la face b' le courant du flint tournerait dans le sens de l'aiguille d'une montre, et c'est aussi précisément dans ce sens que tournent les plans de polarisation, quand le rayon polarisé entrant par a' émerge par b'. Lorsque, par le mouvement du commutateur, on change le sens du courant, et par conséquent les pôles de l'aimant, les pôles de l'armature ou du flint sont pareillement changés ; mais si l'observateur est resté dans la même position, la face d'émergence du flint est alors un pôle austral, pour lequel la rotation du courant est en sens inverse de l'aiguille d'une montre, et se fait par conséquent de *droite à gauche*, et c'est en effet dans ce sens opposé au premier que sont tournés cette fois les plans de polarisation.

Il suffit donc de considérer le flint, ou, en général, le corps diaphane soumis à l'électro-aimant, comme un corps magnétisé par influence ; de voir, dans cette hypothèse, où seraient son pôle austral, son pôle boréal, et son axe magnétique. On sait alors dans quel sens marcherait le courant qui le constitue à l'état magnétique ; ce sens sera toujours celui du mouvement des plans de polarisation.

Cette proposition fondamentale nous conduit à plusieurs conséquences importantes, qui toutes ont été vérifiées par l'expérience.

1° Entre les corps qui exercent la polarisation rotatoire atomique, et ceux qui exercent la polarisation rotatoire magnétique, il y a cette différence essentielle, que dans les premiers, le sens de la rotation est toujours le même, soit que la lumière les traverse dans un sens ou dans l'autre ; c'est pour cela qu'il est permis de dire que telle substance tourne à droite, et telle autre à gauche ; tandis que pour les derniers le sens de la rotation change avec la direction de la lumière : ainsi, dans la figure 23, le sens du courant restant le même, si la lumière entre par a' et que l'observateur soit en b' la rotation est de

Digitized by Google

gauche à droite, comme celle de l'aiguille d'une montre ; au contraire, si la lumière entre par b' et que l'observateur se transporte en a', la rotation se fait de droite à gauche. Par conséquent ici, quand la lumière vient à rebrousser chemin, les plans de polarisation ne repassent pas par les mêmes phases ; on pourrait dire qu'ils se meuvent comme un bateau qui traverse une rivière, et qui va à la dérive par l'influence du courant ; s'il passe et repasse plusieurs fois, il dérive de plus en plus, chaque retour ajoutant son effet à celui du trajet précédent. D'après cela on pourrait en quelque sorte se rendre compte des mouvements des plans de polarisation en supposant que l'électro-aimant détermine, dans l'éther du corps diaphane, un mouvement de rotation, dont la vitesse n'est pas insensible par rapport à celle de la lumière, et qui s'accomplit dans le sens même que l'on a hypothétiquement admis pour être celui des courants constitutifs des aimants.

On peut se servir de cette propriété du mouvement progressif du plan de polarisation pendant l'allée et le retour du rayon lumineux pour accroître les effets observés ; car si l'on dispose, par exemple, des surfaces réfléchissantes en a' et b', pour que le rayon ne sorte qu'après avoir fait trois fois ou cinq fois le trajet entre les surfaces, les effets seront triplés ou quintuplés ; c'est ce qui a été réalisé par M. Faraday.

2° Si le rayon polarisé traverse le flint perpendiculairement à son axe magnétique $a'b'$, l'effet doit être nul, puisqu'alors il n'y a pas plus de raison pour que le plan de polarisation tourne de droite à gauche que de gauche à droite. C'est ce que l'expérience a confirmé. Jusqu'à présent aucune action sensible ne s'est manifestée dans cette direction.

3° Si le morceau de flint a une longueur plus grande que la distance des pôles de l'électro-aimant, s'il se prolonge à droite, de b' et à gauche de a', il se fait alors des pôles contraires en b'' et en a'' ; il devient en quelque sorte un aimant à points conséquents, et les effets des deux portions $b''a'$ et $b'a''$ sont opposés à ceux de la portion $a'b'$. C'est ce qui se vérifie pareillement, soit en prenant, comme nous venons de l'indiquer, un morceau de flint assez long, soit en prenant le morceau $a'b'$, pour le faire passer successivement en $a'b''$ ou en $a''b'$ (*Comptes rendus*, janvier 1846).

Au lieu de faire ces expériences avec un électro-aimant en

Digitized by Google

fer à cheval, comme nous venons de l'indiquer, on peut se servir de bobines électro-magnétiques dont le fer est percé dans sa longueur d'une ouverture de 7 ou 8 millimètres pour laisser passer le rayon lumineux. La figure 26 représente l'appareil que Ruhmkorff a construit d'après cette idée, et qui atteint parfaitement le but. *x* et *y* sont les deux bobines, *ab* et *a'b'* les pôles opposés des pièces de fer aimantées par le courant, et *d* la pièce de flint, ou en général le corps diaphane soumis à l'expérience. Une lampe Locatelli envoie la lumière sur le prisme de Nicol ou *polariseur p*. Le faisceau polarisé, se propageant dans l'axe des bobines, traverse le corps *d* et arrive à l'analyseur *n*, qui est un prisme de Nicol monté sur l'alidade d'un cercle divisé comme dans l'appareil de M. Biot (Fig. 22).

Dans mes expériences, je m'étais servi de l'appareil à compensateur de Soleil, et j'avais pareillement employé un système de plusieurs bobines mises à la suite l'une de l'autre, comme le représente la figure 24; le fer de chacune étant percé d'un trou bien cylindrique, comme dans la figure 25; alors, pour empêcher que la force attractive n'écrase les substances disposées entre deux bobines consécutives, il faut les retenir à distance par des morceaux de bois debout.

218. L'intensité de l'effet produit par une substance donnée est évidemment dépendante de la longueur du trajet de la lumière dans cette substance; mais elle dépend aussi de l'énergie de l'action magnétique sur les dive[illegible]uches au travers desquelles passe le rayon. La loi de l'intensité, par rapport aux dimensions des corps, est donc une loi trop complexe pour qu'il soit bon d'en chercher, dès à présent, l'expression. Cependant il y a une question fondamentale qui s'y rapporte, et qu'il importait de résoudre; c'est celle de savoir si l'action que l'électro-aimant exerce sur un point donné, est seulement fonction de la distance, ou si elle dépend à la fois de la distance et des matières plus ou moins impressionnables qui peuvent être interposées entre le point donné et la surface de l'électro-aimant lui-même. Cette question a été résolue dans un très-bon travail, présenté comme sujet de thèse à la Faculté des sciences de Paris, au mois d'août 1847, par M. Bertin, ancien élève de l'Ecole normale. Il résulte des expériences de M. Bertin, que l'action de l'électro-aimant est simplement fonction de la distance, c'est-à-dire que chacune des tranches d'un corps est

Digitized by Google

impressionnée comme si les autres tranches n'existaient pas.

En effet, en plaçant dans le champ magnétique de l'appareil de Ruhmkorff deux morceaux de flint, et en ôtant successivement l'un ou l'autre, sans rien changer au reste, il arrive toujours que les sommes des rotations de chacune des pièces, quand elle est seule, reproduisent fidèlement la rotation des deux pièces réunies (*Ann. de Chimie et de Physique*, t. XXIII, p. 5). Ce premier fait bien établi, il restait à chercher suivant quelle loi varient les effets dans une substance diamagnétique, à raison de l'intensité de la force magnétique elle-même, et à raison de la distance à laquelle elle agit. M. Bertin avait fait dans ce but des essais intéressants : il avait constaté que devant le pôle d'un aimant la rotation du plan de polarisation décroît en progression géométrique quand la distance à la surface polaire augmente en progression arithmétique. Sans avoir le moindre doute sur l'exactitude de ces résultats je ne les avais pas cités jusqu'à présent, parce que je les considérais comme purement accidentels; d'ailleurs, si la grandeur de la rotation se trouvait par là rattachée à la distance polaire, il arrivait que ses rapports avec l'intensité magnétique elle-même restaient inconnus tant que l'on ne déterminait pas la loi suivant laquelle cette intensité change avec la distance polaire dont il s'agit. Les formules que j'ai données (t. I, n° 270) pour exprimer l'intensité de l'action dans un point donné du champ magnétique, s'appliquent parfaitement aux expériences de M. Bertin, et, de ce rapprochement, il serait permis de conclure d'une manière rigoureuse que *chaque élément de substance diamagnétique reçoit de la part d'un pôle magnétique une action qui est en raison directe de l'intensité magnétique dont ce pôle est doué*, *et en raison inverse du carré de la distance à laquelle cette action s'exerce.*

Cette loi générale se trouve aussi établie d'une manière directe par les expériences de M. Wiedemann et par celles de M. Verdet. M. Wiedemann a observé les rotations du plan de polarisation produites par une simple bobine de fil de cuivre, sans fer ni aimant, sur le sulfure de carbone, l'essence de citron, l'essence de térébenthine; ces liquides renfermés dans des tubes de verre de 25 centimètres de longueur, occupaient l'axe de la bobine qui avait la même longueur, et qui se composait de 6 kilogrammes de fil de $2^{mm},3$ de diamètre; le courant était

produit par 30 éléments de Grove. Cet appareil était disposé pour comparer la rotation à l'intensité du courant, et les résultats montrent qu'elle lui est proportionnelle; ils montrent de plus que les substances douées, comme l'essence de térébenthine, d'un pouvoir rotatoire propre, sont influencées par le courant comme le sulfure de carbone et les autres liquides qui, par leur constitution, n'acquièrent le pouvoir rotatoire que par l'action magnétique (*Ann. de Chimie et de Physique*, t. XXIV, p. 121, janvier 1852). M. Verdet a exclusivement opéré avec les électro-aimants, qui exercent des actions bien plus énergiques que les simples bobines. En donnant à l'appareil de Ruhmkorff de larges armatures cylindriques de 14 centimètres de diamètre, il a obtenu un champ magnétique très-étendu, et il a vérifié d'abord que les plaques de flint et de *verre pesant* de 40 millimètres d'épaisseur sur lesquelles il expérimentait, prenaient le même pouvoir rotatoire, sur l'axe du champ, mais à diverses distances des surfaces polaires, pourvu qu'elles n'en approchassent pas de trop près. Ensuite pour comparer les rotations à l'intensité magnétique, M. Verdet détermine celle-ci, par l'intensité du courant induit qu'elle est capable de développer dans une petite bobine de fil de cuivre dont l'axe coïncide avec celui du champ magnétique, et qui est rapidement tournée de 90° autour d'un axe horizontal passant par son centre; l'intensité de ce courant induit se mesure à son tour par la déviation qu'il est capable d'imprimer par *première impulsion* à une aiguille galvanométrique. Ce mode repose sur le principe que j'ai établi en 1844 (t. I, n° 347); ici, les courants ayant une grande intensité, l'aiguille magnétique n'est point compensée, c'est un barreau ou un tube d'acier de 30 centimètres de longueur sur 15 millimètres de diamètre extérieur; le galvanomètre se compose de 100 mètres de fil de cuivre de 1^{mm} de diamètre. Les déviations de l'aiguille ne dépassent pas 3°, elles sont observées par la méthode de M. Weber : L'aiguille est suspendue dans l'axe du galvanomètre, par un châssis de cuivre, soutenu par un fil de soie sans torsion; ce châssis, à sa partie supérieure et au-dessus du galvanomètre, porte un petit miroir perpendiculaire à l'axe de l'aiguille, au-devant duquel sont disposées à $1^{m},25$ de distance une lunette mobile dans un plan vertical, et, un peu au-dessous, une règle horizontale divisée en millimètres; l'aiguille communique tous ses mouvements au châssis et au miroir, ils font corps

Digitized by Google

avec elle. A l'état d'équilibre et de repos complet, le zéro des divisions, réfléchi sur le miroir, vient tomber sous le fil vertical de la lunette; quand l'aiguille reçoit l'impulsion du courant induit, et qu'elle s'écarte à l'est ou à l'ouest de 1°, 2°, ou 3°, elle emporte le miroir, et alors c'est la division correspondante à 2°, à 4° ou à 6° qui vient, à l'extrémité de l'excursion, s'arrêter un instant sous le fil de la lunette; on l'observe aisément, on en déduit l'amplitude de la déviation, par suite l'intensité du courant induit qui lui est proportionnelle, et enfin l'intensité de l'action du champ magnétique qui est à son tour proportionnelle à celle du courant induit. L'aiguille, revenant vers sa position d'équilibre, ne tarde pas à s'y arrêter, parce que l'intérieur du galvanomètre est garni d'une plaque de cuivre rouge de 10mm d'épaisseur qui éteint promptement les oscillations.

Cet appareil est très-ingénieusement combiné; cependant, il y a deux points sur lesquels il s'élève des doutes dans mon esprit : 1° La garniture de cuivre rouge dont je viens de parler et qui est utile dans une foule de circonstances, me semble ici être une cause d'erreur; car elle ajoute son action à celle de la terre, pour arrêter l'impulsion de l'aiguille, et l'on ne sait pas comment varie son influence avec la vitesse due à l'impulsion primitive; l'aiguille libre me semble de beaucoup préférable. 2° On ne peut pas douter que la vitesse un peu incertaine avec laquelle on tourne à la main la petite bobine d'induction, n'apporte des variations sensibles dans l'intensité du courant induit. On pourrait remarquer encore que le galvanomètre, ayant 10 centimètres de largeur, se trouve quatre ou cinq fois trop large pour que les plis du fil enroulé vers les bords aient une efficacité suffisante, lorsque l'aiguille n'obéit qu'à une action de très-courte durée et ne s'écarte que de quelques degrés.

Au reste, on peut, je crois, se rassurer sur ces causes d'irrégularité, car les résultats de M. Verdet sont très-concordants, pour montrer qu'en effet l'action des pôles magnétiques est en raison directe de leur intensité et en raison inverse du carré de la distance (*Annales de Chimie et de Physique*, t. XLI, 1854).

Dans un deuxième mémoire (*Annales de Chimie et de Physique*, t. XLIII, 1855), M. Verdet a étudié un autre point important de la question dont il s'agit : on savait depuis longtemps, comme nous l'avons rappelé plus haut, que la rotation diminue quand le rayon de lumière cesse d'être dirigé suivant la ligne des

Digitized by Google

actions magnétiques, et qu'elle est tout à fait nulle quand ces deux directions font entre elles un angle droit; mais il restait à trouver la loi de cette diminution. M. Verdet y est parvenu, par le même mode d'observation, en modifiant seulement la forme des armatures de son électro-aimant, afin que leur ligne magnétique, tout en conservant la même intensité absolue, puisse faire, au moins, un quart de révolution autour de la plaque et du faisceau polarisé. Ces expériences, instituées et conduites avec une grande sagacité, donnent pour résultat final une loi remarquable par sa simplicité, savoir : *que la rotation du plan de polarisation est proportionnelle au cosinus de l'angle que le rayon de lumière fait avec la ligne des actions magnétiques.*

Le tableau suivant, tiré du travail de M. Bertin, donne les rotations relatives qu'une même puissance magnétique peut imprimer à une épaisseur égale des diverses substances les plus aptes à en recevoir l'action.

Flint Faraday	1,00	Protochlorure de phosphate	0,51
Flint Guinaut	0,87	Chlorure de zinc dissous	0,55
lint Mathiessen	0,83	Chlorure de calcium dissous	0,45
Flint très-dense du Conservatoire	0,55	Eau	0,25
Flint commun	0,53	Alcool ordinaire 36 degrés	0,18
Bichlorure d'étain	0,77	Éther	0,15
Sulfure de carbone	0,74		

Digitized by Google

CHAPITRE V.

Notions théoriques.

Nous ne savons rien, d'une manière directe, sur la constitution de l'éther; mais les expériences nous ayant conduit à en admettre l'existence et à considérer la lumière comme un mouvement qui est excité dans ce fluide impondérable, et qui s'y transmet de proche en proche, le but de la science doit être de chercher quel est l'ensemble des propriétés, soit essentielles, soit accidentelles, qu'il faut lui attribuer pour rendre compte de tous les phénomènes que l'étude de la lumière nous présente. Si parmi ces propriétés il s'en trouvait qui dussent être évidemment incompatibles ou contradictoires, il faudrait bien reconnaître que l'hypothèse, d'abord séduisante, du système des ondulations, est elle-même contraire à la raison et incompatible avec les faits; mais si les propriétés dont il faut douer la substance hypothétique de l'éther, pour expliquer la plupart des phénomènes, et représenter les lois auxquelles ils sont soumis, sont de telle nature qu'elles puissent se concilier entre elles et avec les principes incontestables de la mécanique, il faudra bien reconnaître aussi que le système des ondulations repose sur des bases solides, qu'il est conforme à la réalité des choses, et que la science, en continuant ses efforts, soit par la voie des recherches expérimentales, soit par celle des déductions mathématiques, doit parvenir aux lois simples et fondamentales qui enchaînent étroitement tous les faits relatifs à la lumière.

En même temps, les propriétés constitutives de l'éther, se trouvant par là mises en évidence et clairement démontrées, il est au moins présumable que l'on sera conduit à la découverte de certains autres mouvements que ce même fluide peut recevoir et qui, pour être d'une nature différente de ceux qui s'accomplissent pour la production ou la transmission de la lumière, ne sont pas sans doute étrangers aux phénomènes chimiques ou physiques que la matière pondérable nous présente.

Les mouvements et les propriétés de l'éther donnent donc

Digitized by Google

naissance à un vaste problème de mécanique qui ne le cède en importance, ni au grand problème de la mécanique céleste, ni à aucun de ceux qui ont été résolus sur ce qu'on appelle les fluides impondérables de la chaleur, du magnétisme ou de l'électricité. Ce n'est pas dans les éléments de physique qu'il est possible d'aborder un tel sujet, et d'indiquer les travaux, déjà considérables, qui ont été accomplis dans cette voie; mais le moment semble venu d'y introduire quelques notions simples, pour faire comprendre au moins d'une manière nette et précise le caractère mécanique des vibrations de l'éther, de leurs périodes, et de leur composition ou de leur influence mutuelle dans les cas les moins compliqués. J'aurais pu présenter ces notions successivement dans les divers chapitres auxquels elles se rapportent; mais j'ai pensé que l'étude en serait plus facile si, groupées à part, elles pouvaient conserver l'enchaînement logique qui les unit.

J'ai essayé de les réduire à quelques propositions fondamentales que je vais successivement développer.

Proposition I. Les vitesses d'un mouvement de vibration moléculaire isochrone sont représentées par une expression de la forme $v = m \sin 2\pi t$.

m est la vitesse maximum, ou ce que nous appellerons le *coefficient de vitesse*; c'est une longueur rapportée à une unité arbitraire.

t est le temps compté à partir de l'origine du mouvement, et exprimé en prenant pour unité la durée d'une vibration entière, c'est-à-dire la durée du va-et-vient.

Une molécule ou une masse infiniment petite, pondérable ou impondérable, écartée de sa position d'équilibre, tend à y revenir en vertu de la résultante des forces constitutives du milieu qui l'environne. Représentons par x la distance à laquelle, à un instant donné, cette molécule se trouve de sa position d'équilibre, et par v sa vitesse au même instant; admettons de plus que la force inconnue qui la ramène soit elle-même proportionnelle à la distance x, et imprimée par ax.

Les équations du mouvement seront :

$$\frac{dv}{dt} = ax \quad \text{et} \quad v = -\frac{dx}{dt},$$

d'où l'on tire

$$vdv = -axdx; \quad v^2 = -ax^2 + c \quad \text{et} \quad x = \sqrt{\frac{c - v^2}{a}}.$$

Cette valeur de x, substituée dans la première équation, donne

$$dt = \frac{dv}{\sqrt{a(c - v^2)}};$$

d'où

$$t = \frac{1}{\sqrt{a}} \text{ arc } \left(\sin = \frac{v}{\sqrt{c}}\right),$$

en plaçant l'origine du temps à l'origine du mouvement, c'est-à-dire en supposant que l'on a la fois $t = 0$ et $v = 0$. Il en résulte

$$v = \sqrt{c}.\sin t\sqrt{a}.$$

La vitesse est donc périodique : d'abord nulle pour $t = 0$, elle prend des valeurs croissantes, à mesure que le temps augmente, jusqu'à ce que $t\sqrt{a} = \frac{\pi}{2}$, qui donne pour vitesse maximum $v = \sqrt{c}$; t continuant à croître, la vitesse décroît, et redevient nulle pour $t\sqrt{a} = \pi$; au delà de ce point elle est négative, c'est-à-dire que le mouvement s'exécute en sens contraire, et dans cette nouvelle direction atteint la même vitesse maximum $\sqrt{c}$, lorsque $t\sqrt{a} = \frac{3\pi}{4}$; enfin ces vitesses négatives décroissent à leur tour, comme les vitesses positives s'étaient accrues, et l'on retombe sur $v = 0$ pour $t\sqrt{a} = 2\pi$.

Ainsi l'hypothèse d'une force proportionnelle à l'écartement de la molécule conduit pour cette molécule à un mouvement de vibration ou d'oscillation, tout à fait analogue au mouvement de la molécule pondérable qui fait partie d'une onde sonore.

Ces vibrations sont isochrones ; et, en prenant pour unité de temps la durée d'une vibration entière, c'est-à-dire d'une allée et d'un retour, la constante a, qui est relative à l'intensité de la force, disparaît, et la vitesse prend la forme générale

$$v = m \sin 2\pi t.$$

Alors la constante m, qui est une longueur, représente, non pas l'écart de la molécule, mais la vitesse maximum qu'elle possède à l'instant où elle repasse par sa position primitive d'équilibre. On comprend en effet, en vertu de l'isochronisme, que la durée de la vibration restant la même, la vitesse maximum du milieu de l'excursion puisse passer par tous les degrés de grandeur, depuis une valeur presque nulle jusqu'à une valeur presque infinie.

Cette valeur de la vitesse de vibration peut se construire géo-

Digitized by Google

métriquement de diverses manières : si l'on décrit, par exemple, un cercle de rayon m, la série des lignes perpendiculaires à un diamètre représentera bien la série des valeurs de v; mais cette représentation aura l'inconvénient d'être indépendante de l'amplitude des vibrations; si l'on trace au contraire à angle droit deux lignes aa' et mm' (Pl. 45, Fig. 9), qui se coupent en leur milieu, la première étant égale à l'amplitude de vibration, et la seconde au double du coefficient m, et que sur ces lignes comme axes l'on construise l'ellipse $ama'm'$, il est facile de voir que la molécule vibrante, soit qu'elle aille de a en a', ou qu'elle revienne de a' en a, aura pour chacune de ses positions p, une vitesse représentée par la perpendiculaire correspondante sp pour le premier cas, et $s'p$ pour le second.

En représentant par p la demi-amplitude de vibration, les demi-axes de cette ellipse seront m et p, et son équation aura la forme

$$p^2y^2 + m^2x^2 = p^2m^2.$$

On voit de plus qu'à un instant quelconque du mouvement, la distance $op = x$ de la molécule à sa position primitive o sera

$$x = \frac{p}{m}\sqrt{m^2 - y^2}; \quad \text{et comme} \quad y = m \sin 2\pi t,$$

$$x = p \cos 2\pi t.$$

Proposition II. Une vibration primitive, en se communiquant à l'éther, donne naissance à des vibrations longitudinales et à des vibrations transversales. On admet que ce sont les vibrations transversales qui produisent la lumière ; alors, à une distance z de l'ébranlement primitif, assez grande pour que l'onde soit plane, dans l'étendue du faisceau de lumière que l'on considère, toutes les molécules d'éther qui se trouvent sur la section perpendiculaire à l'axe de ce faisceau, vibrent ensemble d'un mouvement commun et parallèle, sans sortir du plan de cette section, et leur vitesse de vibration est exprimée par la formule

$$v = a \sin 2\pi (t - z).$$

L'unité de temps est toujours la durée de la vibration primitive qui se conserve la même à toute distance.

La distance z est exprimée en prenant pour unité la longueur d'ondulation, qui caractérise l'espèce de lumière, et qui reste toujours la même dans le même milieu.

Digitized by Google

On peut aussi considérer z comme représentant la *phase* de vibration.

Le coefficient a est une longueur dont l'unité est arbitraire : seulement cette unité doit être la même pour toutes les vitesses que l'on veut comparer entre elles.

a^2, ou le carré du coefficient de vitesse, représente l'intensité de lumière.

Supposons, en effet, que le mouvement primitif de vibration dont nous venons de parler, s'accomplisse dans un milieu où l'éther soit homogène, et partout de même densité et de même élasticité ; il est évident qu'il se transmettra de proche en proche dans toutes les directions. Mais nous ne considérerons ici que la transmission qui se fait perpendiculairement à la ligne de vibration aa' (Fig. 10) ; alors, dans le plan de la figure, comme dans tous les autres plans passant par aa', les molécules, progressivement ébranlées, passeront successivement à droite et à gauche de la perpendiculaire ol ; si bien qu'à un instant donné, par exemple, après 10 000 vibrations entières de la molécule qui oscille entre les limites a et a', il y aura 10 000 ondulations courant à la suite l'une de l'autre sur la ligne ol. Ces ondulations auront des longueurs égales, et la longueur de chacune sera égale à la distance à laquelle le mouvement s'est propagé sur ol pendant la durée d'une vibration entière. Il est certain que la longueur d'ondulation doit être quelquefois beaucoup plus grande que l'amplitude de vibration, puisqu'elle se conserve la même pour toutes les amplitudes grandes et petites ; mais l'on ne peut pas dire d'une manière absolue que l'amplitude ne prend jamais une étendue comparable à la longueur d'ondulation elle-même.

Soit z la distance au centre d'ébranlement d'une molécule m de ol, cette distance étant exprimée en prenant pour unité la longueur d'ondulation ; la vitesse v de vibration de cette molécule peut être représentée par la formule

$$v = a \sin 2\pi(t - z),$$

l'origine du temps étant toujours l'origine du mouvement qui se fait sur aa' et l'unité de temps étant toujours la durée d'une vibration.

Tant que t est plus petit que z l'arc $2\pi(t - z)$ est négatif, et cela signifie que le mouvement n'est pas encore parvenu à la molécule m ; mais t continuant à croître, $t - z$ prend successive-

Digitized by Google

ment les valeurs 0, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, 1, qui correspondent à l'origine du mouvement, à la vitesse maximum *a*, à la vitesse nulle qui termine la première moitié de la vibration, puis aux vitesses négatives qui correspondent à la seconde moitié.

Le coefficient *a*, qui exprime la vitesse maximum de la molécule *m*, est sans doute dépendant de la distance *z* et de la vitesse maximum qui se produit en *aa'*; mais en considérant la distance *z* comme très-grande, on peut regarder le coefficient comme constant pour des valeurs de *z* très-voisines l'une de l'autre.

Ainsi, dans ce mode de propagation, la direction du rayon lumineux est la ligne *ol*, et les mouvements de l'éther présentent ce double caractère : 1° ils s'accomplissent transversalement et perpendiculairement au rayon; 2° ils se conservent dans un plan déterminé, passant par la ligne *aa'* de l'ébranlement primitif.

Les mêmes mouvements s'exécutent avec les mêmes périodes et les mêmes caractères, dans tous les plans méridiens d'un cylindre, ayant pour axe la ligne *aa'*, et pour rayon la distance $om = z$; la surface de ce cylindre est alors ce qu'on appelle la *surface de l'onde*, parce qu'elle contient tous les points qui reçoivent au même instant le mouvement émané de la même origine. La génératrice *gg'* de ce cylindre ne doit pas être limitée à la longueur *aa'*, qui marque l'amplitude du mouvement primitif, mais elle augmente à mesure que l'onde se propage plus loin, car il est nécessaire seulement que les distances *og* et *og'* soient sensiblement égales à la distance *om*. S'il pouvait n'exister à la fois qu'une seule molécule vibrante de *a* en *a'*, telle que nous la considérons ici, elle ne produirait pas une lumière également intense dans toutes les directions; le mouvement qu'elle excite, par exemple, sur le prolongement de *aa'*, n'est pas propre à exciter la sensation de la lumière, bien qu'il soit analogue à celui qui constitue dans l'air l'onde sonore; et il paraît que dans les directions obliques comprises entre *om* et *oa'*, l'intensité de la lumière irait en décroissant suivant une certaine loi. C'est pourquoi nous considérons particulièrement l'onde cylindrique, admettant ainsi que le mouvement vibratoire qui constitue la lumière, s'exécute sur la surface même de l'onde et perpendiculairement à la ligne de transmission *om*, ou au rayon lumineux.

Digitized by Google

La longueur moyenne des ondulations lumineuses visibles étant d'environ 5 dix-millièmes de millimètre, on peut présumer que l'amplitude ua' des vibrations n'atteint pas ordinairement cette limite ; il suffit par conséquent de considérer le mouvement vibratoire à quelques décimètres de la source qui produit la lumière, pour être autorisé à dire que cette distance est très-grande par rapport à l'amplitude du mouvement. Alors, si l'on ne considère en même temps qu'une petite étendue de l'onde cylindrique où tous les mouvements sont concordants, il est permis de dire que l'*onde est plane* et perpendiculaire à la direction du rayon lumineux, ou, plus exactement, perpendiculaire à l'axe du faisceau de lumière. Réciproquement, étant donné, sous ces conditions, un faisceau de lumière, résultant d'un mouvement élémentaire permanent, on se représentera sa constitution physique, en imaginant un plan perpendiculaire à son axe, et en concevant que toutes les molécules d'éther, contenues dans cette section, vibrent en quelque sorte tout d'une pièce, glissant dans ce plan d'un mouvement commun de va-et-vient, toujours parallèle à la direction de l'ébranlement primitif.

La formule $v = a \sin 2\pi(t - z)$, qui n'était d'abord relative qu'à une seule molécule, s'applique évidemment à toutes les molécules de la section que nous venons de considérer ; a, t et z ayant au même instant la même valeur pour chacune d'elles.

Corollaire 1. Il importe de remarquer que l'expression de la vitesse n'éprouve aucune altération lorsqu'on retranche, soit de t, soit de z, toutes les unités entières qu'ils contiennent. Soient en effet $t = n + \theta$; $z = n' + \varphi$; il en résulte

$$2\pi(t - z) = 2\pi(n - n' + \theta - \varphi),$$

et par conséquent $\sin 2\pi(t - z) = \sin 2\pi(\theta - \varphi)$. Alors φ est une fraction positive comprise entre 0 et 1 ; et comme l'unité est ici la longueur d'ondulation, φ sera une fraction de longueur d'ondulation. Comme il arrive d'ailleurs que les diverses périodes d'une vibration entière correspondent exactement aux diverses portions d'une longueur entière d'ondulation, nous pouvons admettre aussi que φ représente la *phase* de vibration, c'est-à-dire que la molécule vibrante se trouve à ses points de repos pour $\varphi = 0$ et $\frac{1}{2}$, et au milieu de sa course d'allée et de sa course de retour pour $\varphi = \frac{1}{4}$ et $\frac{3}{4}$. Cette substitution de la phase à la distance ou à la longueur d'ondulation a quelques avantages lors-

que l'on compare entre elles plusieurs ondes arrivant sur une molécule : car au lieu de dire que ces ondes ont parcouru des chemins dont l'un surpasse l'autre, par exemple, de deux vibrations et un quart, il sera permis de dire que la différence de leur phase est d'un quart de vibration, ou qu'à l'instant où la molécule serait à son point de repos en obéissant à la seconde, elle se trouverait juste au milieu de sa course d'*allée* en obéissant à la première ; ce serait le milieu de la course de *retour* pour une différence de $\frac{3}{4}$ de vibration.

Ainsi, en conservant t et z dans la formule des vitesses, nous pourrons indifféremment considérer z comme représentant une distance à l'ébranlement primitif ou une phase de vibration.

Les ondes ou les vibrations concordantes sont celles pour lesquelles z diffère d'un nombre entier de longueurs d'ondulation, ou celles qui ont même phase ; les ondes ou les vibrations non concordantes sont celles pour lesquelles z ne diffère pas d'un nombre entier de longueurs d'ondulation, ou celles qui n'ont pas même phase.

Le faisceau dont nous venons de parler, dont la vitesse est $v = a \sin 2\pi (t - z)$, appartient à une couleur rigoureusement simple et élémentaire, qui est caractérisée par la durée de la vibration, ou par la longueur d'ondulation qui en est une conséquence, puisque toutes les vibrations de même durée se communiquent à la même distance dans le même temps, et que les vibrations d'une moindre durée donnent des ondes d'une moindre longueur.

Corollaire 2. L'intensité de ce faisceau est dépendante de a, ou de la valeur du coefficient de vitesse : or, quand cette vitesse arrive au fond de l'œil, pour agiter l'éther et produire en nous la sensation de lumière, l'effet physiologique varie sans doute comme l'effet mécanique : celui-ci étant proportionnel au carré de la vitesse, on admet que l'effet physiologique est dans le même rapport, c'est-à-dire que l'*intensité* d'un faisceau de lumière est représentée par le carré du coefficient de la vitesse de vibration.

Mais l'on ne peut comparer ainsi que les intensités appartenant à la même couleur, car, pour deux couleurs différentes, les durées de vibration étant différentes, les alternatives de repos et de mouvement deviennent inégales, et il n'y a plus de comparaison physiologique possible ; c'est au reste ce qui arrive aussi

Digitized by Google

dans les vibrations sonores : il n'est pas moins impossible de comparer les intensités de deux tons, l'un grave et l'autre aigu, que de comparer les intensités de deux couleurs, l'une rouge et l'autre violette.......

Corollaire 3. Enfin, nous devons ajouter que le faisceau élémentaire dont nous venons d'indiquer les caractères, est un faisceau de *lumière complétement polarisée ;* car la lumière polarisée est celle dont les vibrations sont toutes parallèles entre elles. Nous admettons, avec la plupart des physiciens, que dans un faisceau polarisé, le *plan de polarisation* est celui qui passe par l'axe du faisceau et qui est perpendiculaire au mouvement de vibration, de telle sorte que les molécules vibrantes passent alternativement d'un côté à l'autre de ce plan; ainsi le *plan de polarisation* n'est en réalité que le *plan d'équilibre*.

Ces définitions une fois posées pour une vibration simple, ou pour une seule onde lumineuse, nous allons voir maintenant comment l'on peut trouver la résultante de plusieurs mouvements vibratoires, sous la double condition qu'ils appartiennent à la même espèce de lumière ou qu'ils aient exactement la même durée, et qu'ils se propagent suivant la même ligne, c'est-à-dire, qu'ils donnent naissance à des faisceaux de lumière dont les axes soient sensiblement parallèles.

Proposition III. Deux vibrations rectangulaires concordantes peuvent toujours être remplacées par une seule vibration résultante, dont la direction et le coefficient de vitesse sont représentés par la diagonale du rectangle construit sur les coefficients de vitesse des deux vibrations composantes.

Soient $v = a \sin 2\pi(t-z)$ et $v' = a' \sin 2\pi(t-z)$ les vitesses de vibrations données.

Sur les axes ox, oy (Fig. 12) qui représentent les directions de ces vibrations dont l'effet va se faire sentir sur la molécule o, prenons des longueurs oa et oa' égales aux coefficients a et a', et construisons le rectangle, la diagonale ob donne la direction de la vibration résultante, et sa longueur b en donne le coefficient de vitesse. En effet, puisque les vibrations sont concordantes, la molécule o est toujours au même instant sollicitée par des vitesses proportionnelles à a et a', tantôt dans les sens ox, oy, tantôt dans les sens ox', oy'. Elle doit donc toujours se mouvoir de o vers b ou de o vers b'. Ainsi la direction de la diagonale est la direction de la vibration résultante. Soit u sa vitesse,

Digitized by Google

elle aura la forme $u = b \sin 2\pi (t - z)$: et comme l'on doit avoir à chaque instant $u^2 = v^2 + v'^2$, il en résulte $b^2 = a^2 + a'^2$.

On voit que dans ce cas l'intensité de la lumière de l'onde résultante est égale à la somme des intensités des ondes composantes.

Corollaire 1. En se rappelant ce que nous avons dit tout à l'heure du caractère de la lumière polarisée, on voit pareillement que deux faisceaux élémentaires, polarisés à angle droit et concordants, l'un d'une vitesse a' et l'autre d'une vitesse a, se résolvent toujours en un seul faisceau polarisé dans un plan pp', qui fait avec le plan de polarisation oy du premier faisceau qui vibre suivant ox, un angle ω tel que $\tang \omega = \frac{a'}{a}$, cet angle est de 45^0 quand on a $a = a'$, c'est-à-dire quand les deux faisceaux ont la même intensité.

Corollaire 2. Réciproquement, une vibration donnée peut toujours se décomposer d'une infinité de manières en deux vibrations rectangulaires, et toutes ces solutions se réduisent à une seule, soit quand on donne la direction de l'une de ces vibrations, soit quand on donne son coefficient de vitesse, pourvu qu'il soit plus petit que celui de la vibration donnée.

Prenons ob pour la direction de la vibration donnée et $u = b \sin 2\pi (t - z)$ pour sa vitesse; ses composantes v et v' suivant les axes ox et oy sont $v = u \cos \omega$ et $v' = u \sin \omega$, ou $v = b \cos \omega \sin 2\pi (t - z)$ et $v' = b \sin \omega \sin 2\pi (t - z)$, ou enfin $v = a \sin 2\pi (t - z)$, et $v' = a' \sin 2\pi (t - z)$ en faisant $a = b \cos \omega$ et $a' = b \sin \omega$.

Cette proposition explique et justifie la loi de Malus (**192**), sur le partage de la lumière polarisée. La vibration qui se fait suivant ob n'est en effet autre chose qu'un faisceau d'intensité b^2 polarisé dans le plan pp' perpendiculaire à la vibration; et les axes oy et ox représentant, l'un la section principale du prisme bi-réfringent, faisant un angle ω avec le plan de polarisation, l'autre la perpendiculaire à la section principale. Le faisceau qui est polarisé dans la section principale oy est celui qui vibre suivant ox, ayant a ou $b \cos \omega$ pour coefficient de vitesse, et par conséquent $b^2 \cos^2 \omega$ pour intensité; le faisceau qui est polarisé perpendiculairement à la section principale est celui qui vibre dans cette section, ayant pour coefficient de vitesse a' ou $b \sin \omega$ et pour intensité $b^2 \sin^2 \omega$ ou $b^2 (1 - \cos^2 \omega)$.

Ainsi l'action du prisme bi-réfringent sur un faisceau polarisé,

Digitized by Google

n'est autre chose qu'une simple action décomposante, transformant un mouvement vibratoire qui s'accomplissait dans une direction unique et déterminée, en deux autres mouvements vibratoires qui s'accomplissent maintenant dans deux autres directions perpendiculaires entre elles.

Il faut cependant remarquer qu'après la décomposition qui se fait dans le prisme bi-réfringent, les deux vibrations perpendiculaires ne peuvent plus être concordantes que sous certaines conditions, à cause de l'inégalité de vitesse des rayons ordinaire et extraordinaire.

Corollaire 3. Il en résulte encore que, sous l'intervention du prisme bi-réfringent, tout faisceau d'intensité b^2 polarisé dans l'azimut ω par rapport à un plan donné peut être remplacé par deux faisceaux polarisés à angle droit, l'un d'une intensité $b^2 \cos^2 \omega$ polarisé dans ce plan, l'autre d'une intensité $b^2 \sin^2 \omega$ polarisé dans un plan perpendiculaire.

Proposition IV. Les vibrations concordantes, qui, en se propageant sur la même ligne, s'accomplissent dans des directions diverses, peuvent toujours être remplacées par une seule vibration résultante, dont la phase est la même, et dont la direction et le coefficient de vitesse se déterminent, au moyen des directions et des coefficients de vitesse des vibrations composantes.

Deux ondes planes se propageant suivant la même ligne que nous supposons perpendiculaire au plan de la figure 11, arrivent simultanément pour ébranler la molécule o, et pour la faire vibrer, l'une dans la direction oa, l'autre dans la direction oa'. En obéissant séparément à la première et à la seconde, la molécule prendrait des vitesses

$$v = a \sin 2\pi (t - z), \text{ et } v' = a' \sin 2\pi (t - z).$$

Menons par le point o deux axes rectangulaires ox et oy, soient ω et ω' les angles de oa et oa' avec l'axe des x; les vitesses v et v' peuvent être décomposées en deux autres, dirigées suivant les axes ox et oy; la vitesse résultante u n'est autre chose que la résultante de deux vitesses rectangulaires, l'une $v \cos \omega + v' \cos \omega'$ dirigée suivant ox, l'autre $v \sin \omega + v' \sin \omega'$ dirigée suivant oy; on a donc :

$$\begin{aligned} u^2 &= (v \cos \omega + v' \cos \omega')^2 + (v \sin \omega + v' \sin \omega')^2 \\ &= v^2 + v'^2 + 2vv' \cos(\omega - \omega'); \end{aligned}$$

Digitized by Google

d'où il résulte, en substituant, pour v et v', leurs valeurs :

$$u = b \sin 2\pi(t - z), \quad \text{et} \quad b = \sqrt{a^2 + a'^2 + 2aa' \cos(\omega - \omega')}.$$

Ainsi, de même qu'il existe toujours une force capable de produire, sur un point, le même effet que deux forces distinctes qui le sollicitent, il existe toujours aussi une onde unique capable de remplacer deux ondes concordantes. Cette *onde résultante* est caractérisée, comme les ondes élémentaires, par la direction de son mouvement et par le coefficient de sa vitesse; or ces deux données s'obtiennent par cette construction très-simple : considérez les coefficients de vitesse des ondes composantes comme les forces dirigées suivant la direction même du mouvement de ces ondes, et prenez leur résultante, sa grandeur et sa direction représentant, l'une le coefficient de vitesse, et l'autre la direction de mouvement de l'onde résultante.

L'angle θ, que la direction de l'onde résultante fait avec l'axe des x, est donné par la relation :

$$\tang \theta = \frac{a \sin \omega + a' \sin \omega'}{a \cos \omega + a' \cos \omega'}.$$

Il est facile de voir que, pour le cas où les ondes élémentaires sont coïncidentes, perpendiculaires ou opposées, les valeurs de $\omega - \omega'$ sont o, $\frac{\pi}{2}$ et π; celles de b sont $a + a'$, $\sqrt{a^2 + a'^2}$ et $a - a'$; ainsi a^2 et a'^2 représentant les intensités des deux faisceaux composants, et b^2 celle du faisceau résultant, il arrive que, dans le second cas, qui nous reporte à la proposition précédente, l'intensité résultante est égale à la somme des intensités composantes; et que, dans le premier cas, cette somme doit être augmentée, et, dans le troisième, diminuée du double produit des racines carrées des intensités composantes.

Il importe de remarquer ici comment sont comptés les angles ω et ω' : suivant l'usage ordinaire, ces angles doivent être comptés à partir de ox et depuis o jusqu'à 2π; c'est à cette condition que $\omega - \omega'$ ou $\omega' - \omega$ représente fidèlement l'angle que font entre elles les deux directions oa et oa', angle qui peut lui-même s'élever jusqu'à 2π. Pour s'en rendre compte, il suffit de supposer que la direction oa' devient successivement ob, oc, od, passant ainsi dans les trois quadrans qui ne contiennent pas oa. Mais dans les expériences, où l'on a en général à considérer des

Digitized by Google

plans de polarisation divers, et des sections principales de prismes bi-réfringents diversement inclinées, soit entre elles, soit par rapport à ces plans, il est en général plus commode de ne compter les angles que jusqu'à $\frac{\pi}{2}$, ou dans un seul quadran : cela est possible ; seulement il faut alors avoir recours à une correction particulière, pour rétablir les angles avec leurs véritables signes. Cette correction consiste à ajouter dans l'expression de la vitesse, une demi-phase, ou $\frac{1}{2}$, à toutes les vibrations, qui, au lieu d'être projetées sur les lignes elles-mêmes que l'on a choisies pour point de départ, se trouvent projetées sur leur prolongement. C'est ce que nous allons montrer par un exemple : les composantes de la première vibration étant toujours $v \cos \omega$ et $v \sin \omega$, par rapport aux axes ox et oy, celles de la seconde vibration seront aussi toujours $v' \cos \omega'$ et $v' \sin \omega'$, soit qu'elle se trouve dirigée suivant oa' ou suivant ob, oc ou od, et ω' représente alors les angles $a'ox$, ou box', ou cox', ou dox. Les vitesses totales sur l'axe des x et sur l'axe des y sont

$$v \cos \omega + v' \cos \omega'$$

et

$$v \sin \omega + v' \sin \omega',$$

ou

$$a \cos \omega \sin 2\pi\,(t-z) + a' \cos \omega' \sin 2\pi\,(t-z)$$

et

$$a \sin \omega \sin 2\pi\,(t-z) + a' \sin \omega' \sin 2\pi\,(t-z).$$

Or, si l'angle ω' avait été compté à partir de ox, $\cos \omega'$ serait négatif dans le deuxième et le troisième quadran ; c'est-à-dire, pour les directions ob et oc, dont les projections tombent sur ox' prolongement de ox ; donc la formule serait fautive, et pour la corriger, il suffira d'écrire alors $a' \cos \omega' \sin 2\pi\,(tz - \frac{1}{2})$, qui devient en effet $-a' \cos \omega' \sin 2\pi\,(t-z)$; de même sur l'axe des y, $\sin \omega'$ aurait été négatif pour les directions oc et od, et pour corriger l'erreur il suffit d'écrire

$$a' \sin \omega' \sin 2\pi(t - z - \tfrac{1}{2}) = -a' \sin \omega' \sin 2\pi(t-z).$$

C'est ainsi que nous avons dû procéder en établissant la théorie de Fresnel sur les couleurs des lames cristallisées (**200**).

La composition des deux ondes s'étendant à un nombre quelconque, il en résulte que toutes les ondes concordantes qui se propagent en suivant la même ligne, peuvent toujours, quelles que soient les directions diverses de leurs vibrations, se réduire à une onde unique, dont le coefficient de vitesse et la direction de vibra-

Digitized by Google

tion sont déterminés. Cette onde résultante est nécessairement polarisée, puisque c'est là toujours le caractère d'une onde unique.

Proposition V. Les vibrations non concordantes, qui, en se propageant sur la même ligne, s'accomplissent dans la même direction, peuvent toujours être remplacées par une seule vibration, dont la direction est la même, et dont le coefficient de vitesse et la phase se déterminent au moyen des coefficients de vitesse et des phases des vibrations composantes.

Deux ondes planes arrivent à la molécule o pour l'agiter dans le plan de la figure, leurs mouvements sont parallèles, c'est-à-dire qu'ils s'accomplissent sur la même ligne; mais ils sont non concordants, c'est-à-dire qu'à l'instant où le premier atteint, par exemple, la vitesse maximum, le second n'atteint pas la sienne, et s'en trouve plus ou moins éloigné; nous avons donc ici

$$v = a \sin 2\pi(t - z)$$

et

$$v' = a' \sin 2\pi(t - z').$$

Soit u la vitesse résultante, elle est égale à la somme des vitesses élémentaires, prises avec leur signe; on a donc

$$u = a \sin 2\pi(t - z) + a' \sin 2\pi(t - z'),$$

ou

$$u = \sin 2\pi t(a \cos 2\pi z + a' \cos 2\pi z') - \cos 2\pi t(a \sin 2\pi z + a' \sin 2\pi z').$$

Soit

$$b \cos 2\pi x = a \cos 2\pi z + a' \cos 2\pi z'$$
$$b \sin 2\pi x = a \sin 2\pi z + a' \sin 2\pi z',$$

il est facile d'en tirer

$$u = b \sin 2\pi(t - x), \text{ et } b = \sqrt{a^2 + a'^2 + 2aa' \cos 2\pi(z - z')}.$$

Ainsi la vitesse résultante est de même forme que les vitesses composantes, ou, en d'autres termes, la molécule dont il s'agit reçoit des deux systèmes d'ondes, le même mouvement que si elle était sollicitée par un système unique, dont le coefficient de vitesse serait b, et dont la phase serait x.

La valeur de b est de même forme que pour les ondes concordantes; seulement l'angle $\omega - \omega'$ des directions de vibrations est ici remplacé par $2\pi(z - z')$, c'est-à-dire par la *valeur angulaire* de la différence des phases.

Quant à la valeur de x, elle se déduit aisément des deux équations auxiliaires que nous avons posées; on en tire en effet par l'élimination successive de b, a' et a :

Digitized by Google

$$\frac{a}{a'} = \frac{\sin 2\pi(x - z')}{\sin 2\pi(z - x)}; \quad \frac{a}{b} = \frac{\sin 2\pi(x - z')}{\sin 2\pi(z - z')}; \quad \frac{a'}{b} = \frac{\sin 2\pi(z - x)}{\sin 2\pi(z - z')};$$

c'est-à-dire que les sinus des angles $2\pi(x - z')$, $2\pi(z - x)$, et $2\pi(z - z')$, sont entre eux comme les quantités a, a' et b.

Ainsi, en construisant avec les deux coefficients de vitesse a et a', un parallélogramme dont l'angle soit égal à la valeur angulaire de la différence des phases, la diagonale de ce parallélogramme représente la valeur de b, et les angles de cette diagonale avec a et a' sont les valeurs angulaires des différences de phase entre l'onde résultante et la deuxième onde, et entre la première onde et l'onde résultante.

Nous avons trouvé un exemple remarquable de cette composition des ondes parallèles non concordantes dans l'explication des couleurs des lames cristallisées (**200**).

En poursuivant cette construction pour composer la résultante avec une troisième vibration, puis la nouvelle résultante avec une quatrième, on arriverait à une résultante définitive, d'une certaine phase et d'un certain coefficient de vitesse, représentant à elle seule tous les systèmes donnés de vibrations parallèles non concordantes.

Proposition VI. Deux vibrations discordantes, qui, en se propageant sur la même ligne, s'accomplissent dans des directions différentes, ne peuvent pas en général être remplacées par une vibration unique, mais elles peuvent toujours l'être par deux vibrations discordantes dont les directions sont perpendiculaires.

Les vitesses des deux vibrations dont il s'agit étant $v = a \sin 2\pi(t - z)$, et $v' = a' \sin 2\pi(t - z')$, désignons par ω, ω' les angles de leurs directions avec l'axe des x; la première donnera avec les axes deux composantes $v \cos \omega$, $v \sin \omega$, et la seconde deux autres composantes $v' \cos \omega'$, $v' \sin \omega'$; les angles ω et ω' étant comptés jusqu'à 2π, les vitesses totales seront $v \cos \omega + v' \cos \omega'$ sur l'axe des x, et $v \sin \omega + v' \sin \omega'$ sur l'axe des y.

Soient u la résultante de ces deux vibrations discordantes qui sont dirigées sur l'axe des x, et b son coefficient de vitesse; soient de même u' la résultante de celles qui sont dirigées sur l'axe des y, et b' son coefficient de vitesse. En procédant

Digitized by Google

comme nous venons de le faire dans la proposition précédente, il est facile de voir que l'on aurait

$$u = b \sin 2\pi(t - x);$$
$$b^2 = a^2 \cos^2 \omega + a'^2 \cos^2 \omega' + 2aa' \cos\omega \cos\omega' \cos 2\pi(z - z');$$
$$u' = b \sin 2\pi(t - x');$$
$$b'^2 = a^2 \sin^2 \omega + a'^2 \sin^2 \omega' + 2aa' \sin\omega \sin\omega' \cos 2\pi(z - z').$$

Or, pour que ces deux résultantes perpendiculaires entre elles fussent concordantes, il faudrait qu'elles eussent même phase, ou que l'on eût $x = x'$; condition qui, pour être remplie, exigerait que l'on eût

$$\frac{\sin 2\pi(x - z')}{\sin 2\pi(z - x)} = \frac{\sin 2\pi(x' - z')}{\sin 2\pi(z - x')} \quad \text{ou} \quad \frac{a \cos\omega}{a' \cos\omega'} = \frac{a \sin\omega}{a' \sin\omega'},$$

ou, enfin, $\sin(\omega - \omega') = 0$, c'est-à-dire $\omega - \omega' = 0$ ou π.

Les deux résultantes dont il s'agit ne seront donc jamais concordantes, à moins que les deux vibrations composantes ne s'accomplissent dans la même direction, ce qui nous ferait retomber dans le cas précédent. Ce cas excepté, deux vibrations discordantes ne peuvent donc jamais être remplacées par une vibration résultante unique; mais elles peuvent toujours être remplacées par deux vibrations perpendiculaires discordantes.

Le résultat auquel nous arrivons ici peut évidemment s'étendre à un nombre quelconque de vibrations, puisqu'on aurait alors

$$u = v \cos\omega + v' \cos\omega' + v'' \cos\omega'' + \text{etc.},$$
et
$$u' = v \sin\omega + v' \sin\omega' + v'' \sin\omega'' + \text{etc.}$$

Ainsi toutes les vibrations discordantes et non parallèles qui peuvent agir sur une molécule d'éther, se résolvent en dernier résultat en deux vibrations perpendiculaires discordantes.

Proposition VII. Deux vibrations perpendiculaires discordantes peuvent être remplacées par une seule vibration quand leur différence de phase est d'un nombre quelconque de demi-longueurs d'ondulation ; mais ce cas excepté, elles donnent naissance à un mouvement qui cesse d'être linéaire ; la molécule sur laquelle elles agissent décrit alors une ellipse dont les axes ont des positions et des grandeurs relatives différentes suivant la différence des phases et l'amplitude du mouvement des vibrations composantes ; cette ellipse devient un cercle lorsque ces vibrations ont la même amplitude, et lorsque en même temps

Digitized by Google

la différence de leurs phases est d'un nombre impair de quarts de longueur d'ondulation.

Deux ondes planes arrivent à la molécule o (FIG. 13), pour l'agiter dans le plan de la figure ; leurs mouvements vibratoires sont perpendiculaires, l'un s'accomplissant suivant ox, l'autre suivant oy ; les vitesses v et v' qu'elles impriment au même instant, dans le sens de ces axes, sont $v = a \sin 2\pi(t - z)$, $v' = a' \sin 2\pi(t - z')$. En vertu de la première, la molécule se trouverait sur l'axe ox, à une distance x de l'origine, telle que $x = p \cos 2\pi(t - z)$; en vertu de la seconde, elle se trouverait sur l'axe oy à une distance y de l'origine, telle que $y = p' \cos 2\pi(t - z')$; p et p' sont les demi-amplitudes des mouvements de vibration qui seraient excités séparément par la première et par la deuxième onde. En éliminant le temps t entre ces deux équations, on obtient les coordonnées x et y de la molécule, pour un moment quelconque de la durée de la vibration, et par conséquent l'équation de la courbe qu'elle décrit pendant cette durée. Posons pour cela

$$z' - z = \delta, \quad \text{et} \quad 2\pi(t - z') = 2\pi(t - z - \delta) ;$$

il en résulte :

$$y = p' \cos 2\pi(t - z) \cos 2\pi\delta + p' \sin 2\pi(t - z) \sin 2\pi\delta.$$

On a d'ailleurs :

$$\cos 2\pi(t - z) = \frac{x}{p}, \quad \sin 2\pi(t - z) = \frac{1}{p}\sqrt{p^2 - x^2} ;$$

en substituant ces valeurs dans l'équation en y, et en élevant au carré, on trouve :

$$p^2 y^2 + p'^2 x^2 - 2xypp' \cos 2\pi\delta = p^2 p'^2 \sin^2 2\pi\delta,$$

qui est l'équation d'une ellipse ; donc deux ondes qui se propagent sur la même ligne, et dont les vibrations sont perpendiculaires et discordantes, au lieu d'imprimer aux molécules des vibrations rectilignes, impriment en général des mouvements elliptiques et continus.

Pour ne pas entrer dans trop de détails, nous supposerons que les deux ondes ont des amplitudes de vibration égales ou $p = p'$; alors l'équation

$$y^2 + x^2 - 2xy \cos 2\pi\delta = p^2 \sin^2 2\pi\delta$$

représente une ellipse dont les axes font des angles de 45° avec

Digitized by Google

les axes coordonnées (FIG. 14); l'axe des x ayant la position ox' et l'axe des y la position oy'. En représentant comme à l'ordinaire par a le demi-axe des x, et par b le demi-axe des y, il est facile de voir que l'on a pour les grandeurs de ces axes

$$a = \frac{p}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sin 2\pi\delta}{\cos \pi\delta} = p\sqrt{2} . \sin \pi\delta,$$

$$b = \frac{p}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sin 2\pi\delta}{\sin \pi\delta} = p\sqrt{2} . \cos \pi\delta.$$

Par conséquent $\qquad a^2 + b^2 = 2p^2,$

quand la différence des chemins parcourus $z' - z$ ou δ est égale à un nombre entier; ce qui signifie qu'elle est égale à un nombre juste de longueurs d'ondulation, $\sin 2\pi\delta = 0$, $\cos 2\pi\delta = 1$, et $y = x$, c'est-à-dire, que l'ellipse devient une ligne droite oy'; ce qui était facile à prévoir, puisque alors les ondes sont concordantes.

Quand $z' - z = \frac{2n+1}{2}$, ou un nombre impair de demi-longueurs d'ondulation, $\sin 2\pi\delta = 0$, $\cos 2\pi\delta = -1$ et $y = -x$, l'ellipse devient encore une ligne droite dirigée alors suivant ox'.

Quand $z' - z = \frac{2n+1}{4}$ ou un nombre impair de quarts d'ondulation, $\sin 2\pi\delta = \pm 1$, $\cos 2\pi\delta = 0$, $y^2 + x^2 = p^2$.

L'ellipse devient un cercle dont le diamètre $2p$ est égal à l'amplitude du mouvement de vibration. Pour $n = 0$, $z' - z = \frac{1}{4}$. Le second rayon est en retard sur le premier d'un quart d'ondulation; ainsi, quand la molécule est à l'extrémité de sa course ou en repos en p, elle reçoit l'impulsion du second rayon qui est alors au maximum de vitesse, parce qu'il lui reste un quart de vibration à faire pour arriver au repos en p'; la rotation sur le cercle s'accomplit donc de droite à gauche. Au contraire, pour $n = 1$, $z' - z = \frac{3}{4}$, quand la molécule est en p, le second rayon, qui a encore trois quarts de vibration à faire, est au maximum de vitesse; mais il va de o en q', par conséquent il fait passer la molécule qui est en p au-dessous de l'axe des x, et lui imprime ainsi un mouvement de gauche à droite. En généralisant, on voit que le mouvement de droite à gauche a lieu pour n pair, et celui de gauche à droite pour n impair.

Enfin, quand la valeur $z' - z$ n'est pas comprise dans l'une

Digitized by Google

des trois séries précédentes, le mouvement est toujours elliptique, et le grand axe de l'ellipse est tantôt sur ox', tantôt sur oy', suivant que les valeurs de $z-z'$ se rapprochent de celles qui donnent lieu à une vibration linéaire sur la première ou sur la seconde de ces lignes (Fig. 14).

C'est par cette composition des mouvements perpendiculaires et discordants que nous avons pu rendre compte des phénomènes de la polarisation rotatoire (chap. IV).

Proposition VIII. Un faisceau de lumière naturelle dont l'intensité est représentée par 1, peut être considéré comme composé de deux faisceaux polarisés à angle droit, ayant chacun une intensité égale à $\frac{1}{2}$, la direction absolue du système des deux plans de polarisation restant arbitraire. Imaginons en effet deux faisceaux polarisés à angle droit, et se propageant dans la même ligne; soient v et v' leurs vitesses, z et z' leurs phases, a et a' leurs coefficients de vitesse, on aura

$$v = a \sin 2\pi (t-z), \quad v' = a' \sin 2\pi (t-z').$$

L'ensemble de ces deux faisceaux ne pourrait pas être regardé comme représentant de la lumière naturelle, si, en traversant un prisme bi-réfringent, ils ne donnaient pas deux images de même intensité dans toutes les positions de la section principale; car c'est là l'un des caractères de la lumière naturelle ou non polarisée. Concevons donc deux axes rectangulaires ox et oy, le second représentant la section principale, et le premier la ligne perpendiculaire à cette section, soit ω l'angle que le plan de polarisation du premier faisceau fait avec oy, et par conséquent aussi l'angle que sa vibration fait avec l'axe des x; la vibration du second faisceau fera avec le même axe un angle $\omega' = \omega + \frac{\pi}{2}$.

Décomposons maintenant chaque vibration en deux autres dirigées suivant les axes; les composantes de la première seront $v \cos \omega$ sur l'axe des x, $v \sin \omega$ sur l'axe des y; celles de la seconde seront $v' \cos \omega'$ et $v' \sin \omega'$, et en cherchant, comme nous l'avons fait (propos. VI), les coefficients de vitesse b et b' des vibrations résultantes sur chaque axe, nous aurons

$$b^2 = a^2 \cos^2 \omega + a'^2 \cos^2 \omega' + 2aa' \cos \omega \cos \omega' \cos 2\pi (z-z')$$
$$b'^2 = a^2 \sin^2 \omega + a'^2 \sin^2 \omega' + 2aa' \sin \omega \sin \omega' \cos 2\pi (z-z'),$$

ou, à cause de $\omega' = \omega + \frac{\pi}{2}$, et de $a = a'$,

Digitized by Google

$$b^2 = a^2 [1 - \sin 2\omega \cos 2\pi (z - z')],$$
$$b'^2 = a^2 [1 + \sin 2\omega \cos 2\pi (z - z')].$$

b^2 est l'intensité de l'image ordinaire, b'^2 celle de l'image extraordinaire; par conséquent il faudrait que l'on eût sans cesse $b^2 = b'^2 = a^2$.

Or cette condition peut être remplie de trois manières, savoir: par les valeurs changeantes de ω, par les valeurs changeantes de $z - z'$, et par les valeurs changeantes simultanées de ω et de $z - z'$. (Voyez propos. XI.)

1° Si l'on suppose en effet que la section principale du prisme bi-réfringent reste fixe, et que cependant l'angle ω changeant sans cesse, sin 2ω prenne autant de valeurs positives que de valeurs négatives dans un temps très-court, égal à la persistance de nos sensations visuelles, les valeurs moyennes de b^2 et de b'^2 pendant ce temps seront égales; les deux images ordinaire et extraordinaire auront donc le même éclat, et cet éclat nous paraîtra constant, bien qu'en réalité il soit variable d'un instant à l'autre, mais pour des intervalles de temps que nous ne pouvons pas apprécier.

2° On arriverait évidemment au même résultat en supposant ω constant, mais quelconque, et en supposant que c'est la différence de phase $z - z'$ qui varie sans cesse, de telle sorte que cos $2\pi (z - z')$ prenne dans un temps très-court, autant de valeurs positives que de valeurs négatives.

3° Enfin, on arrive encore au même résultat, en supposant que les variations de ω et celles de $z - z'$ aient lieu simultanément, mais qu'elles soient indépendantes l'une de l'autre.

Les considérations suivantes tendent à faire voir que cette dernière hypothèse est la plus probable. En effet, quelles que soient les dimensions d'un corps lumineux, nous devons nous le représenter comme composé d'une foule innombrable de molécules vibrantes, dont les vibrations communiquées à l'éther se propagent avec la vitesse de la lumière jusqu'au point où elles arrivent à nos appareils, pour être soumises à nos expériences. Ne considérons d'abord parmi ces vibrations que celles d'une seule espèce, c'est-à-dire celles dont la durée est la même, et qui produisent une lumière simple et mathématiquement homogène; les centres d'ébranlement qui les ont produites sont peut-être liés les uns aux autres par une dépendance mutuelle, soit

Digitized by Google

qu'ils appartiennent à nos flammes artificielles, où les molécules vibrantes se renouvellent à chaque instant, soit qu'ils appartiennent aux corps solides incandescents, où les mêmes molécules vibrent en place. Mais, en admettant même cette liaison, analogue à celle qui existe entre les diverses parties d'un corps sonore en état de vibration, il serait encore vrai de dire que les vibrations parvenues à la distance où nous pouvons les étudier, sont à chaque instant excessivement nombreuses, et, sans doute, différentes par leur coefficient de vitesse, par leur direction et par leur phase. Cependant, sur un point donné, elles ne sont pas réparties d'une manière symétrique, puisque alors leur résultante serait nulle, et il n'y aurait pas de lumière. Or, à un instant donné, composons toutes ces vibrations par les règles précédentes, il est certain que nous arriverons, ou à une vibration unique qui pourrait être remplacée par un système de deux vibrations égales rectangulaires et concordantes, ou à des vibrations discordantes et obliques, qui, par la proposition VI, peuvent aussi être remplacées par deux vibrations rectangulaires égales, mais discordantes. La première solution n'est qu'un cas particulier; la seconde est évidemment le cas général que nous devons admettre. Dans l'instant suivant, le système de cette foule de vibrations conduira encore en définitive à deux vibrations rectangulaires égales et discordantes; seulement les coefficients de vitesse, les azimuts de vibration et la différence de phase seront différents; ainsi, en décomposant un temps donné, $\frac{1}{10}$ de seconde, par exemple, en autant de parties qu'il y a, pendant $\frac{1}{10}$ de seconde de vibrations de l'espèce de celles que nous considérons, nous pouvons dire que pour chacun de ces instants l'effet de tous les centres d'ébranlements, ou du corps lumineux entier se résume en un système de deux vibrations rectangulaires égales et discordantes, mais que d'un instant à l'autre ce système résultant change d'intensité, d'azimut et de phase.

Il est bon de remarquer ici que, dans la comparaison des valeurs précédentes de b^2 et de b'^2, la valeur de a^2 a pu être regardée comme constante, bien qu'en réalité elle ne soit pas la même pour chacune des vibrations; mais c'est une sorte de moyenne correspondant à un temps fini, plus grand que la durée de la persistance de nos sensations visuelles.

Telle est, dans le système des ondulations, l'idée que nous pouvons nous former d'un faisceau de lumière non polarisé, ap-

partenant à une couleur simple et mathématiquement homogène, et produit par un corps lumineux contenant une multitude indéfinie de centres d'ébranlements de cette espèce.

Comme ces considérations s'appliquent évidemment à chaque espèce de vibration, il en résulte qu'un faisceau de lumière blanche non polarisé est, en définitive, la superposition d'autant de faisceaux, qu'il y a d'espèces de lumières perceptibles, chacun de ces faisceaux élémentaires étant représenté à chaque instant par des vibrations rectangulaires égales et discordantes, dont les coefficients de vitesse, les azimuts et les phases varient d'un instant à l'autre, de telle sorte que dans un temps très-court, $\sin 2\omega \cos 2\pi(z - z')$ prend autant de valeurs positives que de valeurs négatives.

Ainsi, un faisceau de lumière blanche non polarisé peut aussi être représenté par un système de deux faisceaux polarisés à angle droit, ayant même intensité, l'azimut des plans de polarisation restant arbitraire.

Corollaire. D'après cela, *polariser par réflexion* un faisceau naturel et homogène, c'est changer la direction d'une partie des vibrations qui le constituent, de manière que toutes celles qui se réfléchissent soient ramenées exactement dans le même plan; alors, tout rayon polarisé dans un plan donné, peut être décomposé d'une infinité de manières en deux vibrations rectangulaires concordantes, et d'une seule manière en deux vibrations rectangulaires concordantes et égales.

Il en est de même pour la polarisation d'un faisceau blanc.

Pareillement, *polariser par réfraction*, soit par l'intermédiaire d'un milieu diaphane, comme l'eau ou le verre, soit par l'intermédiaire d'un milieu cristallisé quelconque, c'est aussi ramener ou tourner dans le même plan les vibrations transmises. Mais les milieux cristallisés jouissent de cette propriété de ramener en général les vibrations dans des plans perpendiculaires entre eux, et par conséquent de produire en général deux faisceaux polarisés à angle droit; tantôt ces faisceaux sont bifurqués ou séparés l'un de l'autre, comme dans le prisme bi-réfringent, sur lequel nous venons de raisonner; tantôt ils continuent à se propager dans la même direction, et il nous reste à voir quels sont, dans ce cas, les phénomènes auxquels ils donnent naissance; c'est le sujet des deux propositions suivantes, IX et X.

Proposition IX. Un faisceau de lumière naturelle qui a tra-

Digitized by Google

versé une lame de cristal à faces parallèles, forme encore un système de deux faisceaux égaux, discordants et polarisés à angle droit, et, entre ce système et celui qui constitue le faisceau naturel, il y a un caractère distinctif, qui se manifeste par le déplacement des franges diffractées.

En appliquant à une lame cristallisée, dont les faces sont parallèles à l'axe, les raisonnements que nous venons de faire pour le prisme bi-réfringent, nous arriverons au même résultat pour les expressions des images ordinaires et extraordinaires, savoir:

$$b^2 = a^2 [1 - \sin 2\omega \cos 2\pi(z - z')],$$
$$b'^2 = a^2 [1 + \sin 2\omega \cos 2\pi(z - z')];$$

et par les mêmes raisons nous aurons $b^2 = b'^2 = a^2$. Car la seule différence qui existe entre la lame et le prisme est celle-ci : en entrant dans la lame, les deux vibrations rectangulaires n'ont entre elles que leur différence de phase naturelle $z - z'$, et cette différence serait rigoureusement conservée, si le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire se propageaient avec la même vitesse dans l'intérieur du cristal dont la lame est composée ; mais puisque ces vitesses sont différentes, au sortir de la lame, la différence des phases de l'un des rayons par rapport à l'autre, sera augmentée d'une quantité constante ε, dépendante de l'épaisseur de la lame. Or, puisque nous admettons que, dans un temps très-court, la différence naturelle des phases $z - z'$ passe par toutes les valeurs comprises entre 0 et 1, il est évident que $z - z' + \varepsilon$ passera, quel que soit ε, par tous les états de grandeur compris entre n et $n + 1$. Par conséquent, au sortir de la lame, les deux faisceaux polarisés à angle droit, l'un dans la section principale, l'autre dans un plan perpendiculaire à cette section, auront encore des intensités égales entre elles, et égales à a^2. C'est le système de ces deux faisceaux qui remplacera le faisceau naturel. Il est évident qu'il a la même intensité que lui pour chacune des couleurs élémentaires, et qu'il a, par conséquent, en définitive, la même intensité et la même couleur; mais il en diffère par les caractères suivants : 1° l'azimut des plans rectangulaires de polarisation est fixe au lieu de rester arbitraire; 2° les deux vibrations rectangulaires discordantes, qui, avant l'interposition de la lame cristallisée, arrivaient au même point, à un instant donné, ne peuvent plus arriver au même instant, puisque l'une d'elles a éprouvé sur

Digitized by Google

l'autre un retard ε dépendant de l'épaisseur de la lame; c'est précisément ce retard qui produit un déplacement dans les franges diffractées (**184**), lorsque sur les deux portions d'un rayon naturel qui doivent interférer, on interpose deux portions d'une même lame cristallisée, avec l'attention de croiser les axes.

Proposition X. Un faisceau polarisé, qui a traversé une lame de cristal à faces parallèles, dont l'axe est incliné de 45° sur le plan de polarisation, se trouve par là transformé en un système de deux faisceaux égaux, discordants et polarisés à angle droit; mais entre ce système et celui qui constitue un faisceau naturel, il y a des caractères distinctifs qui se manifestent, soit par les couleurs complémentaires plus ou moins éclatantes dont se revêtent les deux images produites par un prisme bi-réfringent, soit par les bandes plus ou moins nombreuses qui se développent dans les spectres résultant de ces images.

Soit $u = a \sin 2\pi(t - z)$ la vitesse de vibration du rayon polarisé, et oa sa direction (Fig. 18); menons les deux axes rectangulaires ox et oy, ce dernier représentant la section principale de la lame cristallisée; soit ω l'angle qu'elle fait avec le plan de polarisation bb'. Les composantes de la vibration donnée seront sur oy, c'est-à-dire pour l'image ordinaire,

$$v = u \sin \omega = a \sin \omega \sin 2\pi(t - z),$$

et sur ox, ou pour l'image extraordinaire,

$$v' = a \cos \omega \sin 2\pi(t - z);$$

au sortir de la lame, les phases des deux vibrations, qui étaient les mêmes en entrant, deviendront différentes, à cause du retard qu'aura éprouvé celle des deux vibrations qui se propage le plus lentement. C'est ce que nous exprimerons en prenant z' pour la phase du rayon extraordinaire. Ainsi, au sortir de la lame, les vitesses seront :

Pour l'image ordinaire,

$$v = a \sin \omega \sin 2\pi(t - z);$$

pour l'image extraordinaire,

$$v' = a \cos \omega \sin 2\pi(t - z').$$

On voit qu'en effet, comme nous l'avons annoncé, pour

Digitized by Google

$\omega = 45^\circ$, ces deux faisceaux sont polarisés à angle droit, égaux et discordants.

Pour étudier maintenant leurs caractères distinctifs, nous les faisons passer par un prisme bi-réfringent, dont la section principale pp' fait un angle ω' avec la section principale oy de la lame cristallisée.

Les composantes des deux images sur cette section et sur la perpendiculaire qq' sont, pour l'image ordinaire qui vibre suivant qq',

$$v \sin \omega' \text{ et } v' \cos \omega',$$

et pour l'image extraordinaire, qui vibre suivant pp',

$$v \cos \omega' \text{ et } v' \sin \omega'.$$

Cette dernière vibration étant discordante, comme projetée sur le prolongement op'.

En représentant donc par b^2 l'intensité de l'image ordinaire, par b'^2 celle de l'image extraordinaire, et par $z - z'$ la différence de phase des deux vibrations, nous aurons :

$$\begin{aligned} b^2 &= a^2 \sin^2 \omega \sin^2 \omega' + a^2 \cos^2 \omega \cos^2 \omega' \\ &\quad + 2a^2 \sin \omega \sin \omega' \cos \omega \cos \omega' \cos 2\pi (z - z'), \\ b'^2 &= a^2 \sin^2 \omega \cos^2 \omega' + a^2 \cos^2 \omega \sin^2 \omega' \\ &\quad - 2a^2 \sin \omega \sin \omega' \cos \omega \cos \omega' \cos 2\pi (z - z'), \end{aligned}$$

ou

$$\begin{aligned} b^2 &= a^2 [\cos^2 (\omega - \omega') - \sin 2\omega \sin 2\omega' \sin^2 \pi (z - z')], \\ b'^2 &= a^2 [\sin^2 (\omega - \omega') + \sin 2\omega \sin 2\omega' \sin^2 \pi (z - z')]; \end{aligned}$$

formules indentiques avec celles que nous avons discutées (**199**).

Nous nous bornerons, en conséquence, à examiner ici plus en détail les phénomènes qui se produisent pour $\omega = \omega' = 45^\circ$; alors

$$\begin{aligned} b^2 &= a^2 (1 - \sin^2 \pi (z - z') = a^2 \cos^2 \pi (z - z'), \\ b'^2 &= \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots a^2 \sin^2 \pi (z - z'). \end{aligned}$$

Soient e l'épaisseur de la lame cristallisée, m l'épaisseur qui correspond à une demi-différence de phase, ou à $z - z' = \frac{1}{2}$, pour le violet extrême, par exemple, dont la longueur d'ondulation est λ, m' l'épaisseur qui correspond à $z - z' = \frac{1}{2}$ pour une autre couleur dont la longueur d'ondulation est λ'.

Pour la première couleur nous aurons $z - z' = \frac{e}{2m}$, et pour la seconde $z - z' = \frac{e}{2m'}$, ou $z - z' = \frac{e}{2m} \cdot \frac{\lambda}{\lambda'}$, parce que les épaisseurs m et m' sont comme les longueurs λ et λ'. Admettons que

Digitized by Google

pour le quartz et la chaux sulfatée la valeur de m soit d'un demi-centième de millimètre, ce qui n'est pas tout à fait exact; tant que l'épaisseur e de la lame n'atteindra pas un demi-centième de millimètre, on aura $z - z' < \frac{1}{2}$; par conséquent, le violet même ne disparaîtra pas, ni dans l'une ni dans l'autre des images; lorsque l'épaisseur sera d'un demi-centième de millimètre, le violet disparaîtra dans l'image ordinaire, et atteindra son maximum dans l'image extraordinaire, tandis que les autres couleurs persistent encore dans les deux images. Si le rapport des longueurs d'ondulation $\frac{\lambda}{\lambda'}$ était le même que dans l'air, ce qui paraît ne pas s'écarter beaucoup de la vérité, on aurait $\frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{2}{3}$; par conséquent le rouge extrême ne disparaîtrait que pour une épaisseur égale à $\frac{3}{4}$ de centième. C'est ainsi que les deux images du prisme bi-réfringent prennent successivement les plus vives couleurs, par l'absence de certains éléments dans l'une des images, et par la prédominance des mêmes éléments dans l'autre; car ce qui manque à $\cos^2 \pi (z - z')$ se retrouve dans $\sin^2 \pi (z - z')$, puisque leur somme est toujours l'unité.

On comprend que si, au lieu de recevoir ces images sur un écran pour en observer les couleurs, on les reçoit d'abord sur un prisme de flint très-pur, pour projeter ensuite les spectres qui en résultent sur un tableau, en se plaçant surtout dans les conditions qui sont propres à faire voir les raies du spectre, on pourra distinguer nettement, par une ou plusieurs larges bandes noires, la couleur ou les couleurs élémentaires qui manquent dans chacune des images.

En effet, ne considérons d'abord que l'image ordinaire, dont l'intensité est $\cos^2 \pi (z - z')$, cette image disparaît pour $z - z' = \frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{2}$, etc., ou pour $2 (z - z')$ égal à un nombre impair; elle prend au contraire le maximum d'éclat pour $z - z' = \frac{2}{2}$, $\frac{4}{2}$, $\frac{6}{2}$, etc., ou pour $2 (z - z') =$ un nombre pair; ainsi l'on parviendra à la faire paraître et disparaître un grand nombre de fois dans l'étendue du spectre, si l'on peut faire en sorte que $2 (z - z')$, ou sa valeur $\frac{e}{m} \cdot \frac{\lambda}{\lambda'}$ prenne un grand nombre de valeurs entières paires et impaires, en donnant à λ' toutes les valeurs depuis $\lambda' = \lambda$, qui correspond au violet, jusqu'à $\lambda' = \rho$, qui correspond au rouge extrême; ou depuis $\lambda' = 1$ jusqu'à $\lambda' = \frac{3}{2}$, si les rapports des

Digitized by Google

longueurs d'ondulation sont les mêmes dans le cristal et dans l'air.

Soit donc $\frac{e}{m} = n$, n étant un nombre entier; on aura $\frac{e}{m} \cdot \frac{\lambda}{\lambda'} = n \cdot \frac{\lambda}{\lambda'} = n - n'$, et il faudra que $n - n'$ puisse représenter plusieurs nombres entiers pairs et impairs, en faisant passer λ' par toutes les valeurs comprises entre ses deux limites; or, la plus petite valeur de λ' est λ, qui correspond à $n = 0$. Sa plus grande valeur, celle qui correspond au rouge, est ρ, qui correspond à $n' = n.\left(\frac{\rho - \lambda}{\rho}\right)$, ou approximativement $\frac{n}{3}$; ainsi, pourvu que n soit plus grand que 3, on pourra faire $n' = 1$, et la valeur corrrespondante de λ' sera $\frac{n\lambda}{n-1}$; et si l'on prend par exemple, $n = 300$, on aura pour n' 100 valeurs 1, 2, 3, 4, etc.... 100, qui correspondront à des valeurs de λ' données par

$$\lambda' = \frac{\lambda . 300}{299}, \quad \frac{\lambda . 300}{298} \quad \ldots . \frac{\lambda . 300}{200}.$$

C'est-à-dire que, dans cette hypothèse, le spectre, dans son ensemble, sera divisé en 100 bandes, 50 brillantes et 50 obscures, uniformément réparties sur sa longueur, offrant cependant des inégalités de largeur absolue, dépendant de la longueur des ondulations, et, par conséquent, de la dispersion propre à la lame cristallisée et au prisme lui-même.

En adoptant approximativement que m est égal à un demi-centième de millimètre, pour le quartz et la chaux sulfatée, les 100 bandes dont nous venons de parler correspondraient à une épaisseur de lame $\frac{e}{m} = 300$, d'où $e = 1{,}5$, c'est-à-dire un millimètre et demi.

Le spectre de l'image extraordinaire présente exactement les mêmes phénomènes, avec cette circonstance remarquable, que ses bandes noires correspondent exactement aux bandes brillantes de l'image ordinaire, et *vice versa*.

Il en résulte enfin que si les deux images étaient exactement superposées, toutes les bandes disparaîtraient, et qu'alors le spectre, avec toutes les apparences d'un spectre ordinaire, aurait cependant cette composition singulière et au premier abord très-étonnante, qu'à des intervalles périodiques égaux à la distance

Digitized by Google

qui sépare le milieu d'une bande brillante du milieu d'une bande sombre, la lumière serait polarisée dans deux plans perpendiculaires; qu'au milieu de chacun de ces intervalles elle aurait la polarisation circulaire, et, soit à droite, soit à gauche de ce milieu, elle offrirait des polarisations elliptiques contraires.

MM. Fizeau et Foucault ont découvert ces derniers phénomènes et ils les ont étudiés avec une rare sagacité; leur travail a été présenté à l'Académie des sciences en 1846.

Proposition XI. La persistance des vibrations lumineuses dans les mêmes phases et dans la même direction se manifeste par les phénomènes d'interférences; et ces phénomènes font connaître qu'elle correspond à une durée qui est physiquement appréciable, non-seulement d'une manière relative, mais aussi d'une manière absolue, c'est-à-dire en fraction de seconde.

Dans toutes les expériences de diffraction, et particulièrement dans les expériences des miroirs de Fresnel (**149**), lorsque, à partir de la bande centrale, on considère par exemple la n^e bande rouge qui correspond à un retard de n longueurs d'ondulation dans l'un des faisceaux, il est certain que cette frange ne pourrait pas se produire et se montrer entre la n^e et la $n+1^e$ frange noire, si les vibrations du corps lumineux quel qu'il soit, qui envoie la lumière, n'avaient pas une certaine persistance dans les mêmes phases et dans la même direction; car, des deux ondes qui interfèrent, celle qui suit le chemin le plus court est partie du corps lumineux plus tard que celle qui suit le chemin le plus long; elle est partie plus tard de tout le temps qui est nécessaire à l'accomplissement des n vibrations qui produisent les n ondulations dont la longueur forme la différence des chemins parcourus. Or, si ces n vibrations ne s'étaient pas exécutées dans la même direction et avec les mêmes phases, les deux ondulations qui se présentent pour interférer au point où se forme la n^e frange que nous considérons, ne se trouveraient plus dans les mêmes conditions, soit que les phases seulement fussent changées, soit que les directions du mouvement le fussent elles-mêmes.

Cependant, de ce que l'on voit en permanence cette n^e frange sans trouble ni confusion, il ne faudrait pas conclure non plus que les vibrations du corps lumineux sont de même permanentes, et qu'elles n'éprouvent aucune modification pendant des minutes ou des heures entières, car, il suffit que les change-

Digitized by Google

ments qui surviennent soient seulement soumis à certaines conditions que nous allons examiner.

En ce qui appartient à la direction du mouvement, les changements peuvent être quelconques pourvu que deux vibrations perpendiculaires entre elles et qui ne peuvent interférer, ou deux vibrations voisines de cette direction ne se produisent pas pendant le temps t qui est nécessaire à l'accomplissement des n vibrations, ou du moins que si elles se produisent, elles ne persistent en somme que pendant un temps très-petit par rapport au temps mt, qui exprime la durée de nos sensations. Mais nous avons vu au contraire (propos. VIII) que si l'on voulait expliquer l'état d'un rayon naturel et non polarisé par la seule variabilité de la direction de la vibration résultante, il faudrait admettre qne pendant le temps mt cette direction se trouve aussi souvent dans une direction donnée que dans la direction perpendiculaire ; il faut donc, pour concilier les phénomènes de la polarisation avec ceux de la diffraction, exclure l'hypothèse de la mobilité du plan de la vibration résultante, ou bien admettre qu'il change progressivement, et que m est extrêmement grand, c'est-à-dire que la durée de nos sensations est très-grande par rapport au temps t pendant lequel s'accomplissent les n vibrations dont nous pouvons observer l'interférence.

En ce qui appartient à la différence des phases, nous avons vu pareillement (propos. VIII) qu'elle peut servir à expliquer l'état d'un rayon naturel et non polarisé, sous la condition que pendant le temps mt l'expression $\cos 2\pi(z-z')$, prenne autant de valeurs positives que de valeurs négatives, ce qui paraît encore inadmissible ici, à moins de supposer mt très-grand par rapport à t.

Il y a donc, sous ce rapport, comme à d'autres égards, un grand intérêt théorique à rechercher quelle est la plus grande différence de marche avec laquelle des faisceaux puissent interférer, afin d'avoir au moins approximativement une expression de la valeur de t.

Or, MM. Fizeau et Foucault ont fait sur ce point, par des procédés ingénieux et nouveaux, des expériences importantes, auxquelles je regrette de ne pouvoir donner ici plus de développements. Ils ont constaté que deux faisceaux qui ont acquis des différences de marche de 2000, de 3000 et même de près de 4000 longueurs d'ondulation, interfèrent aussi régulièrement

Digitized by Google

que ceux qui diffèrent seulement de quelques longueurs d'onde.

J'indiquerai seulement l'un des procédés dont ils ont fait usage : il est représenté dans la figure 19. m et m' sont deux miroirs analogues à ceux de Fresnel ; mais, au lieu de se mouvoir autour de leur arête de jonction, ils se meuvent autour d'un axe u ; la ligne lumineuse produite par une lentille cylindrique. est en b, de telle sorte que la lumière réfléchie est comme si elle partait des points p et p'. Le faisceau réfléchi est reçu à distance sur un écran percé d'une fente très-étroite, et, par le mouvement du miroir m', on comprend qu'il soit facile d'amener sur la fente, successivement, des points du faisceau correspondant à la 50[e] ou à la 100[e] frange d'interférence. A ces distances de la bande centrale, il n'y a plus de couleurs perceptibles, l'image est blanche comme si les deux rayons réfléchis ne pouvaient plus interférer ; c'est donc un faisceau blanc qui passe par la fente et qui a toutes les apparences d'un faisceau naturel ; il est reçu par un système réfringent composé d'un excellent prisme très-dispersif et de deux lentilles, l'une placée au-devant du prisme et l'autre à sa suite. La fente doit se trouver au foyer principal de la première. Le spectre, reçu à une distance convenable, présente la plus magnifique apparence des franges diffractées, et, comme on y voit également bien les raies de Frauenhofer, il est facile de compter les franges comprises entre deux raies données. Soient λ et λ' les longueurs d'onde correspondant à deux raies entre lesquelles on compte m franges ; la différence des chemins parcourus est $n\lambda$ pour la première couleur, $n'\lambda'$ pour la seconde, et l'on a à la fois

$$n\lambda = n'\lambda' \quad \text{et} \quad m = n - n', \quad \text{d'où} \quad n = \frac{m\lambda'}{\lambda' - \lambda}.$$

C'est ainsi que l'on détermine le nombre des longueurs d'onde qui forme la différence des chemins parcourus.

En admettant que la vitesse de la lumière soit en 1″ de 70 000 lieues ou de 280 000 kilomètres, il est facile de voir que le nombre des vibrations qui s'accomplissent en 1″, pour la lumière verte, ayant une longueur d'onde de 5 dix-millièmes de millimètre, est de 560 millions de millions ; si deux faisceaux de cette lumière interfèrent avec une différence de marche de 5600 longueurs d'onde, le temps nécessaire à ces 5600 vibrations n'est

Digitized by Google

qu'un cent-millionième de seconde. Or, en supposant que nos perceptions visuelles durent seulement $\frac{1}{100}$ de seconde, ce temps contiendrait encore mille millions de fois celui qui est nécessaire aux 5600 vibrations. Il est donc bien permis d'admettre, comme nous l'avons admis plus haut, que mt est excessivement grand par rapport à t.

Proposition XII. Lorsqu'un faisceau de lumière polarisée se réfléchit à la surface d'un milieu diaphane, l'intensité du faisceau réfléchi est représentée par

$$\frac{\sin^2(i-i')}{\sin^2(i+i')}\cdot\cos^2\theta+\frac{\tang^2(i-i')}{\tang^2(i+i')}\sin^2\theta;$$

et l'angle de son plan de polarisation avec le plan d'incidence est donné par la relation

$$\tang\theta'=\frac{\cos(i+i')}{\cos(i-i')}\cdot\tang\theta.$$

1, intensité du faisceau incident;

i, i', angles d'incidence et de réfraction;

θ, θ', angles des plans de polarisation des faisceaux incidents et réfléchis avec le plan d'incidence ou avec le plan de réflexion.

Une onde plane ap (Fig. 15) arrive sous une incidence i, à la surface de séparation de deux milieux, par exemple, de l'air et du verre; elle est polarisée dans le plan d'incidence, que nous supposerons être le plan de la figure, de telle sorte que les vibrations s'accomplissent parallèlement à ab, et perpendiculairement au plan abp. Les densités d et d' de l'éther étant différentes dans le premier et dans le second milieu, il se fait, à la surface de séparation, un partage de mouvement : une portion de l'onde se réfléchit en faisant l'angle de réflexion égal à l'angle d'incidence, l'autre se transmet dans le verre sous un angle i', tel que l'on ait $\sin i : \sin i' :: \lambda : \lambda'$; λ et λ' étant les longueurs d'ondulation de la même espèce de lumière dans l'air et dans le verre.

Soient u, v et v' les vitesses de vibration de l'onde incidente, de l'onde réfléchie et de l'onde réfractée; a, h et r les coefficients de ces vitesses; en sorte que l'on ait

$$u=a\sin 2\pi(t-z),\quad v=h\sin 2\pi(t-z)\quad\text{et}\quad v'=r\sin 2\pi(t-z).$$

On admet que dans le cas des vibrations perpendiculaires au

Digitized by Google

plan d'incidence, ou dans l'azimut 0, l'on doive avoir à chaque instant

$$u = v + v' \quad \text{et par conséquent} \quad a = h + r.$$

En considérant d'une autre part les forces vives dont sont animées les masses d'éther qui correspondent à une longueur d'ondulation, soit sur le faisceau incident, soit sur les faisceaux réfléchis et réfractés, il faut que la première soit égale à la somme des deux dernières. Ces forces vives sont $d\lambda pcu^2$, $d\lambda pcv^2$ et $d'\lambda'p'c'v'^2$; en effet, le volume d'éther correspondant à une longueur d'ondulation dans le faisceau incident est un prisme rectangulaire dont les trois dimensions sont λ dans le sens al, $p=ap$ dans le sens ap, et une longueur quelconque c, égale à la largeur du faisceau dans le sens perpendiculaire au plan de la figure; ce volume étant λpc, la masse est $d\lambda pc$, et la force vive $d\lambda pcu^2$; sur le faisceau réfléchi la masse est la même, parce que la perpendiculaire $bp'=ap=p$; enfin, sur le faisceau réfracté, la dimension du prisme dans le sens perpendiculaire au plan de la figure est la seule qui reste la même et égale à c; pour les deux autres, on a λ' et $p' = bq$, et pour la force vive $d'\lambda'p'cv'^2$

Le principe des forces vives donne donc

$$d\lambda pcu^2 = d\lambda pcv^2 + d'\lambda'p'cv'^2,$$

ou

$$d\lambda pca^2 = d\lambda pch^2 + d'\lambda'p'cr^2;$$

et par conséquent,

$$\frac{a^2-h^2}{r^2} = \frac{d'}{d}\cdot\frac{\lambda'}{\lambda}\cdot\frac{p'}{p}.$$

Mais en admettant que l'élasticité de l'éther soit la même dans les deux milieux, il faut, d'après les lois de la mécanique, que les densités soient en raison inverse des carrés des longueurs d'ondulation, ce qui donne $\frac{d'}{d} = \frac{\lambda^2}{\lambda'^2}$, on a de plus $\frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{\sin i'}{\sin i}$, et dans les deux triangles bap et baq, $\frac{p'}{p} = \frac{\cos i'}{\cos i}$, d'où il résulte

$$\frac{a^2-h^2}{r^2} = \frac{\sin i \cos i'}{\sin i' \cos i};$$

et en remplaçant r par sa valeur $a-h$,

$$\frac{a+h}{a-h} = \frac{\sin i \cos i'}{\sin i' \cos i};$$

d'où $\quad \frac{h}{a} = \frac{\sin(i-i')}{\sin(i+i')}, \quad$ et par suite $\quad \frac{r}{a} = \frac{2\cos i \sin i'}{\sin(i+i')}.$

Digitized by Google

Pour ce qui regarde le rayon réfléchi, ses vibrations et celles du rayon incident s'accomplissant dans le même milieu, le rapport φ de leurs intensités est égal au carré du rapport des coefficients de vitesse, ce qui donne

$$\varphi = \frac{h^2}{a^2} = \frac{\sin^2(i-i')}{\sin^2(i+i')};$$

Pour ce qui regarde le rayon réfracté, ses vibrations et celles du rayon incident s'accomplissent dans des milieux différents, le rapport ψ de leurs intensités n'est plus égal au carré du rapport des coefficients de vitesse, mais au carré de ce rapport multiplié par le rapport des masses vibrantes correspondantes. Nous venons de voir que ces masses sont ici $d'\lambda'p'c$ et $d\lambda pc$ dont le rapport est $\frac{\sin i \cos i'}{\sin i' \cos i} = \frac{\operatorname{tang} i}{\operatorname{tang} i'}$; on a donc

$$\psi = \frac{r^2}{a^2} \cdot \frac{\operatorname{tang} i}{\operatorname{tang} i'} = 4\,\frac{\cos^2 i \sin^2 i'}{\sin^2(i+i')} \cdot \frac{\operatorname{tang} i}{\operatorname{tang} i'},$$

d'où $\varphi + \psi = 1$, ce qui devait être. On arrive au même résultat en remarquant que ψ est égal au rapport des forces vives du rayon réfracté et du rayon incident ou

$$\psi = \frac{d'\lambda'p'c \,.\, v'^2}{d\lambda pc \,.\, u^2} = \frac{\operatorname{tang} i}{\operatorname{tang} i'} \cdot \frac{r^2}{a^2}.$$

Quand les vibrations de l'onde incidente s'accomplissent dans le plan d'incidence, et que le plan de polarisation est par conséquent perpendiculaire aux plans d'incidence et de réflexion, ou dans l'azimut de 90°, l'on admet que dans les trois faisceaux les vitesses de vibration sont telles que l'on ait

$$u \cos i = v \cos i + v' \cos i' \quad \text{ou} \quad (a-h') \cos i = r' \cos i',$$

ou

$$r' = (a-h')\frac{\cos i}{\cos i'};$$

en appelant cette fois h' et r' les coefficients de vitesse de l'onde réfléchie et de l'onde réfractée; ce qui revient à dire que la composante horizontale de la vitesse de vibration dans l'onde incidente est égale à la somme des composantes horizontales de la vitesse de vibration des ondes réfléchies et réfractées.[1]

L'équation des forces vives étant toujours

$$\frac{a^2 - h'^2}{r'^2} = \frac{\sin i \cos i'}{\sin i' \cos i},$$

Digitized by

en substituant la valeur de r'^2, elle devient

$$\frac{a+h'}{a-h'}=\frac{\sin i \cos i}{\sin i' \cos i'};$$

d'où

$$\frac{h'}{a}=\frac{\text{tang}\,(i-i')}{\text{tang}\,(i+i')} \quad \text{et} \quad \frac{r'}{a}=\frac{2\sin i' \cos i}{\sin(i+i')\cos(i-i')},$$

et pour le rapport φ' des intensités du rayon réfléchi et du rayon incident

$$\varphi'=\frac{h'^2}{a^2}.=\frac{\text{tang}^2(i-i')}{\text{tang}^2(i+i')};$$

Pour avoir le rapport ψ' des intensités du rayon réfracté et du rayon incident, il faut, comme nous venons de le dire, multiplier $\frac{r'^2}{a^2}$ par $\frac{\text{tang}\, i}{\text{tang}\, i'}$. d'où

$$\psi'=4\,\frac{\sin i \sin i' \cos i \cos i'}{\sin^2(i+i')\cos^2(i-i')}.$$

Enfin, si le faisceau incident, ayant toujours une intensité a^2, est polarisé dans l'azimut θ par rapport au plan d'incidence, il peut alors être remplacé (propos. III, corol. 3) par deux faisceaux, l'un d'intensité $a^2 \cos^2\theta$ polarisé dans le plan d'incidence ou dans l'azimut 0, l'autre d'intensité $a^2 \sin^2\theta$ polarisé dans l'azimut de 90°; le premier donnera un faisceau réfléchi d'intensité inconnue x^2, telle que

$$\frac{x^2}{a^2\cos^2\theta}=\frac{\sin^2(i-i')}{\sin^2(i+i')}.$$

Le second donnera un faisceau réfléchi d'intensité x'^2, telle que

$$\frac{x'^2}{a^2\sin^2\theta}=\frac{\text{tang}^2\,(i-i')}{\text{tang}^2\,(i+i')},$$

par conséquent, l'intensité totale du faisceau réfléchi par rapport à l'intensité du faisceau incident, ou $\frac{x^2+x'^2}{a^2}$ aura pour valeur

$$\cos^2\theta.\frac{\sin^2(i-i')}{\sin^2(i+i')}+\sin^2\theta.\frac{\text{tang}^2\,(i-i')}{\text{tang}^2\,(i+i')}.$$

C'est la formule que nous avons admise et discutée (**192**).

Au moyen de ces éléments constituants du faisceau réfléchi, on peut déterminer aussi l'angle θ' que le plan de polarisation de ce faisceau fait avec le plan d'incidence, c'est-à-dire l'azimut du faisceau réfléchi. En effet, les coefficients de vitessse de la portion

Digitized by Google

du faisceau réfléchi qui vibre perpendiculairement au plan de réflexion, et de celle qui vibre dans ce plan, sont $\frac{h}{a}\cos\theta$ et $\frac{h'}{a}\sin\theta$. Ces deux vibrations se composent en une seule, dont la direction fait, avec le plan de réflexion, un angle θ' tel que

$$\operatorname{tang}\theta' = \frac{h'}{a}\sin\theta : \frac{h}{a}\cos\theta,$$

ou
$$\operatorname{tang}\theta' = \frac{h'}{h}\cdot\operatorname{tang}\theta = \frac{\cos(i+i')}{\cos(i-i')}\cdot\operatorname{tang}\theta.$$

C'est la formule que nous avons admise et discutée (**193**).

Nous remarquerons de plus que la relation

$$\frac{\operatorname{tang}\theta'}{\operatorname{tang}\theta} = \frac{h'}{h}$$

permet de trouver le rapport $\frac{h'}{h}$ quand on connaît les azimuts θ et θ' des plans de polarisation du rayon incident et du rayon réfléchi ; ce rapport est celui des vitesses ou des amplitudes de vibrations des deux portions du rayon réfléchi, savoir : de celle qui est polarisée perpendiculairement au plan d'incidence, et de celle qui est polarisée dans ce plan. M. Jamin en a fait usage pour déterminer les limites de la polarisation elliptique des rayons réfléchis, comme nous l'avons vu (**216**).

Si maintenant l'on considère un faisceau de lumière naturelle d'intensité 1, il sera facile d'exprimer les quantités de lumière qu'il donne aux faisceaux réfléchis et transmis, ainsi que les proportions et les quantités de lumière polarisée que les faisceaux doivent contenir. En effet, le faisceau naturel d'intensité 1 peut être regardé comme composé de deux faisceaux ayant chacun une intensité $\frac{1}{2}$, polarisés, l'un dans le plan d'incidence, l'autre dans un plan perpendiculaire, le premier de ces faisceaux donnera à la réflexion une quantité de lumière

$$\varphi = \frac{1}{2}\cdot\frac{h^2\sin^2(i-i')}{a^2\sin^2(i+i')},$$

le second donnera pareillement à la réflexion une quantité de lumière

$$\varphi' = \frac{1}{2}\cdot\frac{\operatorname{tang}^2(i-i')}{\operatorname{tang}^2(i+i')}.$$

et l'intensité du rayon réfléchi sera $\varphi+\varphi'$, celle du rayon transmis ou réfracté sera $1-(\varphi+\varphi')$.

Les deux portions qui constituent le faisceau réfléchi étant polarisées à angle droit, si elles étaient égales elles donneraient à ce faisceau l'apparence d'un rayon naturel et non polarisé, mais elles sont inégales, la première l'emporte sur la seconde, le faisceau réfléchi est donc partiellement polarisé dans le plan d'incidence, et la quantité de lumière ainsi polarisée qu'il contient est

$$\varphi-\varphi'=\tfrac{1}{2}\cdot\sin^2(i-i')\cdot\left[\frac{\cos^2(i-i')-\cos^2(i+i')}{\sin^2(i+i')\cos^2(i-i')}\right];$$

sa proportion par rapport à l'intensité totale du faisceau réfléchi est

$$\frac{\varphi-\varphi'}{\varphi+\varphi'}=\frac{\cos^2(i-i')-\cos^2(i+i')}{\cos^2(i-i')+\cos^2(i+i')}.$$

On voit qu'elle atteint son maximum et devient égale à 1 pour $i+i'=90^\circ$, c'est-à-dire sous l'incidence de la polarisation complète; alors, en effet, toute la lumière du faisceau réfléchi est polarisée dans le plan d'incidence.

Le rayon réfracté se compose pareillement des deux portions

$$\psi=\tfrac{1}{2}\left[1-\frac{\sin^2(i-i')}{\sin^2(i+i')}\right] \quad \text{et} \quad \psi'=\tfrac{1}{2}\left[1-\frac{\tan^2(i-i')}{\tan^2(i+i')}\right],$$

qui sont les compléments des deux portions φ et φ', et qui sont comme celles-ci polarisées dans le plan de réflexion et perpendiculairement à ce plan. Ici, c'est la seconde qui l'emporte sur la première, c'est-à-dire que le rayon réfracté est partiellement polarisé dans le plan de réfraction; et il est visible que la quantité absolue de lumière ainsi polarisée qu'il contient est égale à celle qui dans le rayon réfléchi est polarisée dans le plan d'incidence. Ce qui justifie la loi importante que M. Arago avait tirée de l'expérience avant que la théorie vînt l'expliquer.

Digitized by Google

LIVRE SEPTIÈME.

DE LA CHALEUR.

SECONDE PARTIE.

PROPAGATION DE LA CHALEUR ET CALORIMÉTRIE.

CHAPITRE PREMIER.

Propagation de la chaleur.

§ I. *Phénomènes généraux de la chaleur rayonnante dans l'air et dans le vide.*

219. De l'existence de la chaleur rayonnante et de l'idée qu'on peut se former des rayons calorifiques. — La chaleur rayonnante est celle qui passe au travers de certains corps, comme la lumière passe au travers des corps diaphanes. La chaleur solaire ne vient frapper la terre qu'après avoir traversé toute la couche atmosphérique; et si l'air s'échauffe pendant un jour serein, tout le monde sait que les corps s'échauffent aussi, et qu'en général leur température est beaucoup plus haute que celle de l'air. Donc, une partie de la chaleur du soleil traverse, comme la lumière, toute l'épaisseur de l'atmosphère sans être absorbée. De même, le feu d'un foyer nous échauffe à distance, sans que les couches d'air qui nous séparent de lui soient échauffées de proche en proche, car on s'aperçoit aisément qu'elles restent froides, et même qu'elles peuvent être agitées et rapidement renouvelées sans qu'à la même distance on en ressente un moindre effet. Un boulet rouge de feu, suspendu au milieu d'un apparte-

Digitized by Google

ment, est encore plus propre à montrer ce phénomène : de toutes parts, autour de lui, on reçoit une impression de chaleur tandis que l'air environnant qui ne le touche pas conserve à peu près son état de repos et sa température primitive. Ainsi, les corps qui sont échauffés jusqu'à donner de la lumière ont en même temps un *pouvoir émissif*, c'est-à-dire qu'ils ont la propriété d'*émettre* autour d'eux, dans tous les sens, de la chaleur qui traverse l'air, comme la lumière traverse les milieux diaphanes. C'est d'après cette analogie que l'on dit, en parlant de la chaleur, des *rayons calorifiques*, des *rayons de calorique* ou des *rayons de chaleur*, comme on dit, des *rayons lumineux* ou des *rayons de lumière*.

220. Pouvoir émissif. — Le pouvoir émissif ou *pouvoir rayonnant*, dont nous venons de parler, n'existe pas seulement dans les corps qui sont assez chauds pour émettre à la fois de la lumière et de la chaleur; nous allons faire voir qu'il appartient à tous les corps indistinctement; qu'il peut bien diminuer quand la température diminue, mais qu'il ne peut pas cesser d'exister; qu'il se manifeste encore dans un boulet refroidi au point de n'être plus visible dans les ténèbres comme dans un boulet resplendissant de feu; dans l'eau à la température ordinaire, comme dans l'eau bouillante; dans la glace, dans le mercure congelé, enfin dans tous les corps, quelque froids qu'ils puissent être. D'où il suit que tout corps est, par rapport à la chaleur, ce qu'est, par exemple, la flamme d'une bougie par rapport à la lumière; de tous les points de la flamme partent des rayons lumineux qui se répandent au loin dans l'espace : de même, de tous les points d'un corps quelconque, froid ou chaud, partent sans cesse des rayons de chaleur qui traversent l'air et se propagent librement jusqu'à ce qu'ils rencontrent quelque corps qui les arrête.

Pour montrer cette continuelle action du pouvoir émissif, on dispose en présence l'un de l'autre, à 5 ou 6 mètres de distance, deux grands miroirs sphériques ou paraboliques de cuivre poli, de manière que leurs axes soient coïncidents (Pl. 46, Fig. 1); au foyer du premier on met un boulet chauffé au rouge blanc, ou du charbon allumé, dont on active la combustion avec un soufflet; au foyer du second l'on met un morceau d'amadou; en moins d'une minute on voit l'amadou s'enflammer comme s'il était en contact avec le feu. Cette expérience prouve évidemment le pouvoir émissif du corps incandescent qui est au foyer

Digitized by Google

du premier miroir, car les conditions de l'expérience ne permettent pas de supposer que ce soit l'air chauffé de proche en proche qui vient enflammer le corps combustible ; le coton-poudre, substitué à l'amadou, rend l'expérience encore plus prompte et plus frappante.

Si au boulet rouge on substitue un boulet chauffé seulement à 300°, et au corps combustible un thermomètre ordinaire, on voit le thermomètre monter rapidement : donc à 300° le boulet a aussi un pouvoir émissif.

Maintenant, si au boulet de 300° on substitue un vase rempli d'eau bouillante, ou d'eau à 90°, 80° ou 70°, il sera bien possible que le thermomètre focal du second miroir n'accuse aucune élévation de température très-perceptible ; toutefois cela ne prouve pas qu'à cette température les parois du vase cessent d'avoir un pouvoir émissif, mais seulement que dans ces circonstances le thermomètre ordinaire est trop peu sensible pour en accuser les effets. Alors, il faut avoir recours à des moyens thermométriques plus délicats : soit au thermomètre à air représenté dans la figure 2, soit au thermoscope de Rumford (Fig. 4), soit au thermomètre différentiel de Leslie (Fig. 3), soit au thermo-multiplicateur de M. Melloni (Fig. 5, 6, 7). Quelques mots suffiront pour faire comprendre l'usage de ces appareils.

Le thermomètre à air est simplement une boule de 3 ou 4 centimètres, soufflée à l'extrémité d'un tube d'environ un millimètre de diamètre ; ce tube est recourbé et porte à la fois un renflement dans sa courbure et un entonnoir à son extrémité, afin que le liquide *cd* ne puisse ni retomber dans la boule, ni s'échapper par le haut. Lorsque ses dimensions sont connues, il est facile d'en calculer la sensibilité au moyen des lois de la dilatation de l'air ; mais l'on comprend qu'il est impossible de le graduer, parce que le liquide reste soumis à la pression atmosphérique, et parce qu'il permet à l'air de sortir et de rentrer.

Le thermoscope de Rumford se compose de deux boules *a* et *b*, réunies par un tube recourbé dont la partie horizontale a 3 ou 4 décimètres de longueur. L'*index*, *d*, d'alcool ou d'acide sulfurique, reçoit les pressions opposées de l'air des deux réservoirs, et il marche jusqu'à ce que les pressions soient égales ; le point où il se fixe pour une égalité parfaite de température et de pression est le *zéro* de l'instrument, et l'écart qu'il prend de part et d'autre est à peu près proportionnel à la différence de tempéra-

Digitized by Google

ture des boules. Ces mouvements de l'index sont en général exprimés par des divisions arbitraires; mais il serait facile de les évaluer en degrés centigrades, soit par l'expérience, en disposant autour des boules des vases destinés à recevoir, l'un de la glace fondante, l'autre de l'eau à 1° ou 2°; soit par le calcul, au moyen des dimensions de l'appareil et du coefficient de dilatation des gaz.

Le thermomètre différentiel de Leslie (Fig. 3) repose sur le même principe ; seulement, les réservoirs et le tube sont en général de plus petite dimension ; les branches verticales sont plus longues et plus rapprochées, et la colonne liquide *cd* prend ordinairemeut naissance dans l'une des boules pour s'étendre jusqu'au milieu de la branche verticale de l'autre boule; il peut se graduer comme le précédent.

Le thermo-multiplicateur de M. Melloni se compose d'une pile thermo-électrique analogue à celle que nous avons décrite (t. I^er^, n° **283**, Pl. 22, Fig. 14 et 15), et d'un multiplicateur très-sensible. La pile *p*, soigneusement noircie aux deux bouts avec du noir de fumée, doit être montée sur un pied (Pl. 46, Fig. 5) et mise à l'abri des courants d'air et du rayonnement latéral au moyen des étuis *a* ou *b*; celui-ci sert aussi comme réflecteur pour concentrer sur la pile un plus grand nombre de rayons de chaleur. Le galvanomètre ou multiplicateur est représenté dans la figure 6 : le fil de cuivre qui le compose a environ deux tiers de millimètre de diamètre, et 7 ou 8 mètres de longueur; il fait sur le cadre de métal quarante tours, qui sont symétriquement disposés de part et d'autre de la ligne moyenne sur une largeur de 4 centimètres. Les aiguilles, bien choisies, aimantées et compensées avec soin, sont liées entre elles, comme le représente la figure 7 ; leur système est suspendu à un fil de cocon au sommet de la cloche *c*, au moyen de l'ingénieux mécanisme *d*, qui permet de l'élever ou de le baisser à volonté en tournant le bouton *f* (Fig. 6). Les extrémités du fil du multiplicateur correspondent aux deux trous *m*, *n*. Après avoir posé l'appareil sur un support solide à l'abri de toute vibration, l'avoir mis de niveau pour que le fil de suspension soit au centre du cadran divisé, et l'avoir dirigé dans le méridien des aiguilles, il ne reste plus qu'à établir sa communication avec la pile, ce qui se fait au moyen des spires extensibles *g*, *h*, dont les chevilles terminales se plantent dans les trous *x*, *y* de la pile, et *m*, *n* du

Digitized by Google

multiplicateur. Alors, la moindre différence de température qui existe entre les extrémités noircies de la pile se manifeste par une déviation des aiguilles qui se lit sur le cadran divisé. On doit distinguer ici la *déviation impulsive* et la *déviation définitive*, c'est-à-dire, le maximum d'écart que l'aiguille atteint par son premier mouvement d'impulsion, et l'écart où elle s'arrête après une série d'oscillations, M. Melloni a très-habilement saisi les rapports constants qui existent entre elles, et qui permettent de déduire l'une de l'autre, lorsqu'on a préalablement dressé une table de ces rapports pour chaque appareil. Il en résulte un grand avantage; car, en observant les déviations impulsives, une expérience ne dure que 10 ou 12 secondes, tandis qu'elle devrait durer plusieurs minutes s'il fallait attendre l'équilibre. Quant au rapport qui existe entre la déviation définitive et la différence de température des soudures de la pile, on peut aussi l'obtenir aisément, sinon d'une manière absolue, au moins d'une manière relative ; car M. Melloni ayant constaté, par des expériences analogues à celles que nous avons indiquées (t. I^er^, n° **280**), que, dans les piles de bismuth et d'antimoine, l'intensité du courant est proportionnelle à la différence des températures des soudures, tout se réduit à chercher le rapport qui lie les intensités du courant aux déviations de l'aiguille; pour cela, M. Melloni prend deux sources constantes de chaleur, par exemple, deux lampes de Locatelli ; il les dispose sur l'axe de la pile, l'une à droite, l'autre à gauche, et il les fait agir successivement en ôtant ou en remettant les écrans qui arrêtent leur action calorifique. Les distances sont choisies pour que l'une donne, je suppose, 40° de déviation à droite, et l'autre 35° de déviation à gauche; cela constaté, on les fait agir simultanément, et l'on obtient 15° de déviation à droite; donc 15° à partir du zéro équivalent aux 5° compris entre 35 et 40. On conçoit qu'en variant ces expériences il est facile de dresser une table à deux colonnes : la première, exprimant les déviations définitives observées; la seconde, exprimant des degrés de déviation qu'on observerait si l'écart de l'aiguille n'affaiblissait pas l'action qu'elle éprouve de la part du courant. Dans les appareils de M. Melloni, les deux colonnes de cette table coïncidaient jusqu'à 20°, c'est-à-dire, que jusqu'à cet écart l'intensité était proportionnelle à la déviation; mais, pour 25, 30, 35, 40 et 45° de déviations observées, la deuxième colonne de la table donne

Digitized by Google

27, 35, 47, 62 et 83°. Cependant, par divers artifices ingénieux, M. Melloni a en général réduit toutes ses observations à ne produire que des écarts inférieurs à 30°.

Il serait difficile d'estimer directement, sur l'appareil lui-même, à quelle différence de température correspond une déviation d'un demi-degré, qui est très-facilement observable : mais l'on y parviendrait aisément par le calcul, en construisant une pile dont les éléments, de dimension connue, fussent assez longs pour que les soudures pussent être maintenues à des températures fixes, observées avec de bons thermomètres centigrades. Il suffirait, pour cela, d'appliquer les principes que nous avons développés (t. Ier, chap. VI, *Électro-magnétisme*) sur les intensités des courants.

Si nous reprenons maintenant l'expérience des miroirs, en mettant au foyer du second l'un des appareils que nous venons de décrire, et au foyer de l'autre un corps quelconque d'un ou deux décimètres d'étendue, il nous sera facile de constater que ce corps exerce toujours instantanément une action calorifique, pour peu que sa température *surpasse* la température ambiante. Ce petit excédant de température est la seule condition du succès de l'expérience. Donc, si l'on opère dans un air qui soit à quelques degrés au-dessous de zéro, un morceau de glace donnera de la chaleur au foyer du second miroir, et, si l'on opère à 45° au-dessous de zéro, comme on pourrait le faire dans les régions boréales, un morceau de mercure congelé et fondant donnera de la chaleur au foyer du second miroir. Donc enfin, tout corps a un pouvoir émissif, quelque froid qu'il soit.

Toutes les expériences, excepté la combustion de l'amadou ou du coton-poudre, pourraient se faire avec un seul miroir, au foyer duquel on mettrait l'appareil thermométrique; on peut même se passer de miroir lorsqu'on emploie le thermo-multiplicateur; il suffit alors d'ajuster l'étui conique *b* sur le bout de la pile qui doit recevoir l'action de la chaleur.

221. Pouvoir absorbant. — Tout corps a un pouvoir absorbant qui est aussi en action continuelle pour réparer les pertes dues au pouvoir émissif. Cette proposition est de toute évidence pour les appareils dont nous venons de faire usage, car ils ne s'échauffent au foyer du second miroir que parce qu'ils *absorbent* la chaleur émise par le corps chaud du premier miroir; mais elle doit s'étendre à tous les corps indistinctement, car tous les

Digitized by Google

corps s'échauffent au soleil, et tous sans exception prennent une température plus haute que la température de l'air; ce qui est bien une preuve que ce n'est pas l'air qui les réchauffe. Il y a plus, tous les corps froids se réchauffent aussi dans une enceinte vide où ils sont suspendus; donc, ils absorbent de la chaleur émise par les parois de l'enceinte. Nous verrons tout à l'heure que le pouvoir absorbant peut, comme le pouvoir émissif, varier d'un corps à l'autre dans des limites assez étendues; mais il ne peut, non plus que lui, cesser d'exister ni cesser d'agir.

222. Pouvoir réfléchissant. — Les corps ont en général un pouvoir réfléchissant par lequel ils renvoient, sans l'absorber, une portion plus ou moins grande de la chaleur rayonnante qu'ils reçoivent de toutes les surfaces environnantes, à peu près comme les corps réfléchissent, soit régulièrement, soit irrégulièrement, une portion de la lumière qui vient les frapper. Les miroirs qui nous ont servi sont une preuve bien décisive de cette réflexion de la chaleur, car ils ne s'échauffent pas, même dans l'expérience où l'on enflamme l'amadou. Mais le raisonnement suffit pour indiquer que ce pouvoir existe dans la plupart des corps et qu'il est *complémentaire* du pouvoir absorbant, car la somme des quantités de chaleur absorbées et réfléchies doit toujours reproduire exactement la totalité de la chaleur incidente; par conséquent l'un de ces pouvoirs augmente quand l'autre diminue, et, pour que le pouvoir réfléchissant fût nul, il faudrait que le pouvoir absorbant fût total, ce qui n'arrive, comme nous le verrons, que pour les surfaces soigneusement recouvertes de noir de fumée; au contraire, les surfaces métalliques polies ont un grand pouvoir réfléchissant et un faible pouvoir absorbant. Ces notions générales vont nous servir à établir les principes fondamentaux de la chaleur rayonnante.

223. Principe de l'équilibre mobile de température. — Concevons une enceinte fermée de toutes parts; supposons, pour plus de simplicité, qu'elle ait la forme sphérique, qu'elle soit vide, et que tous ses points aient au même degré le pouvoir de réfléchir, d'émettre et d'absorber la chaleur. La surface extérieure de cette enceinte étant maintenue d'une manière quelconque à une température invariable et uniforme pour tous les points, la surface intérieure aura la même température avec la même invariabilité et la même uniformité. L'équilibre aura lieu dans toute l'étendue de l'enceinte, quelle que soit sa grandeur :

Digitized by Google

qu'elle ait un mètre de diamètre, ou qu'elle ait un million de lieues. Cela posé, on peut concevoir l'équilibre de deux manières : premièrement, on peut imaginer que la surface intérieure ait perdu sa faculté rayonnante, que chacun de ses points n'émette rien dans l'espace vide et ne reçoive rien, que tout enfin reste dans le même état, et que le calorique soit immobile; secondement, on peut admettre que, malgré l'équilibre, la surface intérieure conserve encore sa faculté rayonnante, que chacun de ses points émette dans tous les sens des rayons dans le vide et qu'il en reçoive aussi dans tous les sens, que tout change enfin à chaque instant, et que le calorique soit sans cesse en mouvement et la température sans cesse en équilibre. Cette seconde hypothèse, énoncée pour la première fois par M. Prévost, de Genève, est ce qu'on appelle le principe de l'*équilibre mobile de la chaleur;* ce principe, défini rigoureusement et généralisé par Fourier, est devenu entre ses mains le point de départ de toute la théorie mathématique de la chaleur rayonnante. Il faut voir dans les ouvrages de Fourier, dans ceux de Laplace et de Poisson, quelles sont la portée et l'étendue de cette belle théorie dont les grands géomètres du siècle dernier n'avaient pas même soupçonné l'existence. Nous allons essayer d'en reproduire ici les principes fondamentaux, en les faisant reposer seulement sur les considérations élémentaires.

224. Principe de la raison inverse du carré de la distance. — Si l'on conçoit un corps sphérique au centre d'une enceinte pareillement sphérique, il est évident que les parois de l'enceinte reçoivent toute la chaleur émise par le corps, et que cette chaleur s'y trouve uniformément distribuée, en supposant l'émission du corps uniforme dans tous ses points : mais, si l'enceinte prend un rayon double, sa surface devient quatre fois plus grande, et, comme la quantité de chaleur qu'elle reçoit du corps reste la même, il faut bien que chaque centimètre carré en reçoive quatre fois moins; si le rayon de l'enceinte devient triple, sa surface est neuf fois plus grande, et chaque centimètre carré ne reçoit plus qu'un neuvième, etc. Ainsi, l'intensité de la chaleur diminue comme le carré de la distance augmente; mais cette loi ne s'applique avec rigueur qu'au cas particulier que nous venons d'examiner, ou à ceux qui peuvent s'y ramener : il faudrait bien se garder de l'appliquer, par exemple, au cas de deux surfaces planes d'une certaine étendue, mises en présence l'une de

Digitized by Google

l'autre, en comptant les distances à partir de ces surfaces elles-mêmes.

225. Principe de l'égalité de température dans tous les points d'une enceinte vide, dont les parois sont maintenues à une température constante. — Soient r' le rayon de l'enceinte sphérique (Fig. 8), s' sa surface, e' la quantité de chaleur émise par l'unité de surface dans l'unité de temps; soient r le rayon d'un corps sphérique suspendu au centre de l'enceinte, s sa surface, e la quantité de chaleur émise par l'unité de surface dans l'unité de temps. Admettons que l'enceinte et le corps aient un pouvoir absorbant total, ou un pouvoir réfléchissant nul; et désignons par ω le demi-angle visuel sous lequel le corps est vu d'un point quelconque de l'enceinte. La quantité totale de chaleur perdue par le corps dans l'unité de temps est es; et, si l'on représente par e'' la portion de cette chaleur qui est reçue et absorbée par l'unité de surface de l'enceinte, on aura évidemment $es = e''s'$; d'où :

$$e'' = e.\frac{s}{s'} = e.\frac{r^2}{r'^2} = e.\sin^2\omega.$$

Maintenant, de chaque élément z de l'enceinte, le corps reçoit une certaine fraction b de la quantité totale e' qui est émise par cet élément, et en somme, il reçoit $be's'$; si l'on suppose l'équilibre établi, la quantité reçue est égale à la quantité perdue, ce qui donne $es = be's'$, d'où :

$$be' = e.\frac{s}{s'} = e\frac{r^2}{r'^2} = e.\sin^2\omega = e'',$$

c'est-à-dire que le corps entier reçoit alors, de chaque unité de surface de l'enceinte, une quantité de chaleur be', qui est précisément égale à la quantité e'' qu'il lui envoie, ou, en d'autres termes, l'équilibre existe individuellement pour chacun des éléments de l'enceinte.

Mais, en supposant que le rayon de l'enceinte devienne de plus en plus grand, e'' diminue comme le carré du rayon : donc il en est de même de be'; et comme b est lui même soumis à cette loi de diminution, e' doit rester constant. D'où il résulte que, *sans changer l'équilibre*, diverses portions de l'enceinte peuvent s'éloigner et d'autres se rapprocher, ou, ce qui revient au même, que le corps peut se déplacer dans l'enceinte d'une manière quelconque. Donc, quand l'équilibre est établi, les tem-

Digitized by Google

pératures du corps et de l'enceinte ne doivent pas varier pendant que le corps et l'enceinte se déplacent ou se déforment arbitrairement.

Il faut, de plus, que ces températures soient égales; car, en supposant que l'enceinte se rapproche très-près du corps, on aura à la fois $b = 1$ et $\sin^2 \omega = 1$, et par suite $e' = e$. Or, les quantités de chaleur émises étant, comme nous venons de le voir, indépendantes des grandeurs relatives du corps et de l'enceinte, l'égalité qui existe ici entre elles doit s'étendre à tous les cas, et l'on aura toujours $e' = e$, et, par conséquent, $b = \sin^2 \omega$. Mais, pour des surfaces identiques dénuées de pouvoir réfléchissant, l'égalité des quantités de chaleur émises entraîne évidemment l'égalité des températures; donc enfin, pour l'équilibre, le corps et l'enceinte doivent avoir des températures égales.

Lorsqu'on tient compte du pouvoir réfléchissant des surfaces, on est conduit aux mêmes résultats; mais la démonstration cesse d'être élémentaire : au reste, l'expérience confirme pleinement ce principe pour tous les cas.

226. Loi du cosinus. — L'intensité des rayons de chaleur est proportionnelle au cosinus de l'angle que ces rayons font avec la normale de l'élément qui rayonne. On voit, en effet (Fig. 8) que l'élément z de l'enceinte, émettant une quantité de chaleur e', le globe en reçoit une fraction be' ou $e' \sin^2 \omega$; s'il était vu par l'élément z sous un angle un peu plus grand ω', il en recevrait $e' \sin^2 \omega'$; ainsi, la quantité de chaleur émise dans la zone entière comprise entre ω et ω' est $e' (\sin^2 \omega' - \sin^2 \omega)$; la surface de cette zone étant d'ailleurs $2\pi (\cos \omega - \cos \omega')$, la quantité de chaleur émise par son unité de surface est $\frac{e'}{2\pi} (\cos \omega + \cos \omega')$ ou $\frac{e'}{\pi} \cos \omega$, en supposant ω' peu différent de ω; elle est, par conséquent, proportionnelle au cosinus de l'angle ω.

Il en résulte que la quantité de chaleur émise obliquement par une surface est égale à celle qui serait émise normalement par sa projection, ou *vice versa;* ce qui est aussi confirmé par l'expérience, comme on peut s'en assurer avec un miroir au foyer duquel on met un thermomètre différentiel, ou sans miroir avec le thermo-multiplicateur : pour cela, on prend, par exemple, un cube rempli d'eau chaude, on met son centre dans l'axe de la pile, et devant lui un écran percé d'un trou bien plus petit que la face du cube; alors, l'instrument indique le même effet, soit

Digitized by Google

que la face rayonnante du cube se trouve oblique ou perpendiculaire à l'axe de la pile.

Toutefois, il résulte des expériences de MM. de La Provostaye et Desains que cette proposition n'est rigoureusement vraie que pour les surfaces couvertes de noir de fumée; elle cesse même de l'être quand le noir de fumée est appliqué à l'essence, au lieu de l'être directement en flambant les surfaces. L'intervention des pouvoirs réflecteurs modifie cette loi du cosinus.

227. Loi de la réflexion. — La chaleur se réfléchit comme la lumière, en faisant l'angle de réflexion égal à l'angle d'incidence. Cette proposition se trouve démontrée par l'expérience des miroirs, en remarquant que les foyers de chaleur coïncident avec les foyers de lumière; et l'on peut aussi la démontrer directement avec le thermo-multiplicateur, en disposant convenablement des écrans et des surfaces planes réfléchissantes.

228. Vitesse de la chaleur. — La vitesse de la chaleur paraît être analogue à celle de la lumière; on peut en juger par l'instantanéité de l'action qu'éprouve le thermo-multiplicateur, quand on enlève l'écran qui arrêtait la chaleur; mais cette analogie est encore mieux confirmée par la réfraction de la chaleur, dont nous parlerons dans quelques instants.

229. Comparaison des pouvoirs émissifs, absorbants et réfléchissants des diverses substances. — Quand un corps est en équilibre de température dans une enceinte, son pouvoir émissif est évidemment égal à son pouvoir absorbant, ou, en d'autres termes, ce qu'il perd par l'émission est égal à ce qu'il reçoit par l'absorption; car, sans cela, sa température serait croissante ou décroissante. Au contraire, quand il n'est pas en équilibre, l'un de ces pouvoirs l'emporte sur l'autre, mais ils restent liés entre eux, comme nous le verrons par les lois du réchauffement et du refroidissement. D'une autre part, le pouvoir réfléchissant étant nécessairement complémentaire du pouvoir absorbant, on voit qu'il suffit de déterminer l'un de ces pouvoirs pour en déduire les deux autres. On s'est particulièrement attaché à comparer les pouvoirs émissifs des différents corps à température égale par les deux procédés suivants.

Procédé de Leslie. — On dispose l'une des boules du thermomètre différentiel au foyer d'un miroir, et sur l'axe du miroir, à une distance convenable, on met le centre d'un cube rempli d'eau chaude; lorsqu'on enlève l'écran qui arrêtait la

Digitized by Google

chaleur rayonnante, la boule focale s'échauffe, et arrive à l'équilibre quand l'excédant de chaleur qu'elle reçoit par le rayonnement de la surface du cube est égal à l'excédant de perte qu'elle doit faire par sa plus grande émission et par le contact de l'air. Les excès de température qu'elle prend ainsi pour se mettre en équilibre, sont, comme nous le verrons par les lois du refroidissement, sensiblement proportionnels aux quantités de chaleur qu'elle reçoit de la face du cube; et comme, à température égale, à surfaces et à distances égales, ces quantités de chaleur sont elles-mêmes proportionnelles aux pouvoirs émissifs, on voit que le rapport des excès de température donnés par des faces différentes est précisément le rapport de leurs pouvoirs émissifs.

Procédé de M. Melloni. — On supprime le miroir, on substitue le thermo-multiplicateur au thermomètre différentiel, et l'on observe les déviations impulsives de l'aiguille; de celles-ci on déduit les déviations définitives, et, au moyen de la table dont nous avons parlé, on arrive à comparer les excès de température imprimés au bout de la pile qui regarde le cube; ces excès, comme ceux du thermomètre différentiel, se trouvent proportionnels aux pouvoirs émissifs des faces qui ont été soumises à l'expérience.

Pour le premier procédé, les faces du cube doivent avoir 15 ou 18 centimètres de côté; pour le second, qui est beaucoup plus délicat, il suffit de leur donner 7 ou 8 centimètres. En recouvrant une face de divers enduits d'une épaisseur suffisante, on obtient aussi les pouvoirs émissifs de ces enduits.

Voici les résultats des expériences :

Noms des substances.	Pouvoirs émissifs ou absorbants.	Pouvoirs réfléchissants.
Noir de fumée	100	0
Carbonate de plomb	100	0
Papier à écrire	98	2
Verre ordinaire	90	10
Encre de Chine	85	15
Gomme laque	72	28
Feuille d'argent sur verre	27	73
Fonte avec le meilleur poli	25	75
Mercure (à peu près)	23	77
Fer poli	23	77
Zinc poli	19	81
Acier poli	17	83

Digitized by Google

Noms des substances.	Pouvoirs émissifs ou absorbants.	Pouvoirs réfléchissants.
Platine déposé en couche épaisse, peu poli...	24	76
id. déposé sur cuivre..................	17	83
id. en lames..........................	17	83
Étain...................................	14	86
Métal des miroirs un peu altéré.........	17	83
id. frais poli........................	14	86
Laiton fondu, poli gras.................	11	89
id. battu, poli gras..................	9	91
id. battu, poli vif...................	7	93
id. fondu, poli vif...................	7	93
Cuivre rouge déposé sur fer.............	7	93
id. verni.............................	14	86
id. battu ou fondu....................	7	93
Or plaqué...............................	5	95
Or déposé sur acier poli................	3	97
Argent battu, bien poli.................	3	97
id. fondu, bien poli..................	3	97

Dans ce tableau, j'ai adopté pour les surfaces métalliques, les nombres qui résultent des expériences très-précises de MM. de La Provostaye et Desains; la plupart de ces nombres s'écartent très-notablement de ceux qui avaient été admis jusqu'à ce jour. Ces habiles physiciens ont aussi fait une observation importante, c'est que la proportion de chaleur réfléchie par le verre augmente avec l'incidence à peu près comme augmente la proportion de lumière réfléchie, tandis que sur les surfaces métalliques polies, la proportion est la même sous toutes les incidences jusqu'à environ 70°; et au delà, au lieu d'augmenter, comme on aurait pu s'y attendre, il arrive au contraire qu'elle diminue notablement.

Ainsi, en représentant par 100 le pouvoir émissif du noir de fumée, dont le pouvoir réfléchissant est sensiblement nul, le pouvoir émissif des surfaces métalliques polies varie de 3 à 25; par conséquent, en vertu de leur pouvoir absorbant, ces surfaces absorbent tout au plus $\frac{1}{4}$ et au moins $\frac{3}{100}$ de la chaleur incidente, tandis qu'elles en réfléchissent au moins les $\frac{3}{4}$ et au plus les $\frac{97}{100}$.

Il faut remarquer, cependant, que les rapports des pouvoirs émissifs de ces substances, et par suite ceux de leurs pouvoirs absorbants et réfléchissants, pourraient peut-être ne pas se con-

Digitized by Google

server les mêmes à toute température et pour toute espèce de chaleur : en exposant, par exemple, à la chaleur solaire, du noir de fumée et du carbonate de plomb, il arrive en effet qu'ils cessent d'avoir des pouvoirs absorbants égaux, le carbonate de plomb réfléchissant beaucoup plus de cette chaleur que le noir de fumée ; ce qui tient, soit à une variation réelle du rapport, soit à la détermination trop peu précise que l'on en peut faire à la température ordinaire.

Si l'on voulait déterminer directement le pouvoir réfléchissant par la méthode de Leslie, on pourrait le faire aussi en exposant en avant du foyer du miroir (Fig. 9) des plaques planes des différents corps, et en mettant la boule focale du thermomètre différentiel au foyer des rayons réfléchis. La source de chaleur restant la même, les excès de température de la boule focale seraient entre eux comme les pouvoirs réfléchissants.

Il y a cependant une distinction importante à faire en ce qui touche le pouvoir réfléchissant des corps : sur le miroir métallique le mieux poli, la réflexion de la lumière n'est jamais assez parfaite pour qu'on ne distingue pas la surface, et pour que l'on ne soupçonne pas jusqu'à un certain point la couleur même du métal. Outre la réflexion régulière, il y a donc, en général, deux autres actions qui se produisent, savoir : une sorte de réflexion irrégulière qui disperse dans tous les sens une portion de la lumière incidente sans l'altérer, et une sorte de *pouvoir diffusif* qui disperse aussi dans tous les sens une autre portion de la lumière, mais après l'avoir altérée, après lui avoir imprimé la coloration particulière qui appartient à la nature du corps. A mesure que les surfaces sont moins polies, la réflexion régulière diminue, et le pouvoir diffusif augmente; mais il est difficile de démêler ce qui arrive à la réflexion irrégulière, et il est surtout difficile de juger si la lumière réellement absorbée change dans une grande proportion. Ce qui arrive à la lumière paraît arriver à la chaleur, comme nous le verrons plus loin (236); toutefois, il est peut-être plus difficile encore de démêler ce qui appartient à la réflexion irrégulière de ce qui appartient au pouvoir diffusif.

230. Équilibre de température dans une enceinte quelconque. — Réflexion du froid. — Il résulte de ce qui précède, que, quand l'équilibre de température est établi dans une enceinte quelconque, chaque corps perd autant de chaleur qu'il en ab-

Digitized by Google

sorbe; sa perte va réparer en partie les pertes de tous les corps qu'il *voit*, et réciproquement son gain résulte de l'émission que tous ces corps font vers lui. Cet échange mutuel et constant maintient donc en rapport continuel tous les corps du système, de telle sorte qu'aucun de ces corps ne peut éprouver une modification de température, sans que tous les autres à l'instant participent à cette modification, mais dans des rapports variables à raison de leur grandeur, de leur distance et de leurs pouvoirs calorifiques.

Ainsi, une bougie allumée que l'on introduit dans un appartement change à l'instant par son émission de chaleur la température de tous les corps, comme elle change leur clarté par son émission de lumière. Un morceau de glace produirait un effet analogue, mais d'une intensité différente. Le thermomètre qui en serait voisin baisserait de suite ou monterait, suivant qu'il se trouverait par l'équilibre antérieur au-dessus ou au-dessous de zéro, et son mouvement serait d'autant plus considérable qu'il verrait le morceau de glace sous un angle plus grand, ou qu'il en serait plus rapproché. Lorsque le thermomètre baisse, ce n'est pas que la glace ne lui envoie pas de chaleur, mais elle lui en envoie moins que les corps que sa présence vient cacher au thermomètre, et auxquels elle se substitue; alors le thermomètre, perdant autant et recevant moins, doit nécessairement s'abaisser. Si l'on veut augmenter cet effet, il suffit de mettre le thermomètre au foyer d'un miroir et le morceau de glace en avant; car le thermomètre voyant la glace directement et par réflexion, l'effet sera le même que si l'on avait augmenté les dimensions du morceau de glace, ou que si on l'avait approché plus près du thermomètre. Cette expérience *de la réflexion du froid* parut d'abord paradoxale; on essaya d'en tirer la preuve qu'il existe réellement des *rayons frigorifiques*: mais l'on voit avec quelle simplicité elle s'explique, et comment elle devient une conséquence nécessaire des principes que nous avons développés.

§ 2. *Phénomènes généraux de la chaleur rayonnante dans les substances diathermanes.*

Ce que nous allons dire sur ce sujet est extrait en totalité des belles recherches qui ont été faites par M. Melloni, et qui sont publiées dans les *Annales de Chimie* et dans les *Comptes ren-*

Digitized by Google

dus de l'Académie des sciences (de 1833 à 1839). C'est, comme le dit M. Biot dans le rapport très-remarquable qu'il en a fait à l'Académie des sciences (t. XIV), « un nouveau champ de découvertes que M. Melloni a exploité avec une sagacité, une adresse et une patience inimaginables. » Nous avons à regretter de ne pouvoir en donner ici qu'une idée très-succincte.

231. Des substances athermanes et diathermanes. — Les substances qui arrêtent la chaleur rayonnante, comme les corps opaques arrêtent la lumière, sont appelées substances *athermanes*; au contraire, les substances qui livrent passage à la chaleur rayonnante, comme les corps diaphanes livrent passage à la lumière, sont appelées substances *diathermanes*. Ainsi, l'air est un corps diathermane, et nous allons voir que les corps solides et liquides peuvent aussi avoir des diathermanéités différentes, suivant leur nature, leur épaisseur, l'état de leur surface, la nature de la chaleur qui se présente pour les traverser, etc.

232. Tous les corps diaphanes ne sont pas également diathermanes, et tous les corps opaques ne sont pas également athermanes. — L'appareil qui sert à ces expériences est le thermo-multiplicateur (Fig. 5, 6), dont nous avons déjà parlé (**220**) : les sources de chaleur sont la lampe Locatelli *i*; la spire de platine *k* portée au rouge par la combustion de l'alcool; la plaque de cuivre noircie *l*, portée à 400° par une lampe à alcool; enfin le cube *q*, rempli d'eau bouillante, dont on maintient aussi la température au moyen d'une lampe. Ces sources constantes de chaleur se mettent tour à tour sur le support *e*, qui peut être approché ou éloigné de la pile; des écrans *o*, composés de deux feuilles minces de laiton, sont mobiles à charnière sur leur tige, et peuvent être abaissés ou relevés instantanément; enfin, des supports ayant des ouvertures de grandeur convenable sont destinés à recevoir les plaques des différents corps que l'on veut soumettre à l'expérience. Maintenant, si l'on essaye les diverses sources de chaleur, qu'on note les déviations impulsives correspondantes pour en déduire les déviations définitives, et par suite l'expression des intensités, puis, qu'après cela on interpose sur le trajet de la chaleur successivement des lames *r* de sel gemme, d'alun, de verre noirci, de quartz très-enfumé, etc., pour obtenir aussi les intensités correspondantes, on reconnaît, en les comparant aux premières : que le sel gemme laisse passer la presque totalité de la chaleur,

Digitized by Google

quelle que soit la source, que l'alun n'en laisse jamais passer qu'une portion très-petite, et d'autant plus petite que la température de la source est moins élevée; tandis que le verre noir et le quartz enfumé, qui sont assez opaques pour laisser voir à peine le disque du soleil, laissent passer une portion de chaleur beaucoup plus grande que l'alun, bien qu'elle soit décroissante aussi avec la température de la source.

Ainsi, le sel gemme est très-diathermane, et l'est également pour toutes les sources; l'alun excessivement peu, et d'autant moins que la température de la source est moindre; le verre noir et le quartz enfumé ont une diathermanéité très-étonnante si on la compare à leur opacité, mais elle diminue aussi avec la température de la source.

235. La quantité de chaleur réfléchie perpendiculairement sur les deux faces d'une plaque diathermane est à peu près constante et égale à $\frac{1}{13}$ de la chaleur incidente. — Si l'on représente par 100 l'intensité de chaleur qui tombe sur une plaque de sel gemme, l'intensité de celle qui passe est toujours 92,3, quelle que soit la source. Ainsi, la quantité absorbée ou réfléchie sur ses deux faces est 7,7; ce qui donnerait bien environ $\frac{1}{13}$ s'il n'y avait pas d'absorption sensible. Or, des plaques d'un millimètre ou de plusieurs centimètres d'épaisseur donnant le même résultat, on est déjà porté à conclure qu'en effet le sel gemme n'atténue la chaleur que par réflexion, et non par absorption.

Cette conclusion devient une certitude par les expériences suivantes.

On prend, d'une part, 1 plaque de verre de 8 millimètres d'épaisseur, et, d'une autre part, 6 plaques de verre pareil, la première de 2 millimètres, et les autres d'épaisseur variable, mais formant avec la première une épaisseur totale de 8 millimètres : l'intensité du faisceau transmis par la plaque de 8 millimètres est 23; celle du faisceau transmis par les six plaques est 15; l'absorption étant la même, l'affaiblissement dû au groupe de 6 est l'effet seul de la réflexion. Pour déterminer ce qui appartient à la première et à la deuxième surface, on peut donc raisonner comme si l'absorption était nulle : soient i l'intensité du faisceau incident, r, r' les proportions qui seraient réfléchies à la première et à la deuxième surface si l'intensité primitive était l'unité, l'intensité du faisceau qui tombe sur la deuxième sur-

Digitized by Google

face du verre de 8 millimètres sera $i\ (1-r)$, et celle du faisceau transmis par cette deuxième surface, $i\ (1-r)\ (1-r')$: c'est aussi l'intensité qui serait transmise par le premier verre du groupe de 6; mais il est facile de voir que l'intensité du faisceau transmis par le sixième verre de ce groupe, après les six réflexions extérieures et les six réflexions intérieures, serait définitivement $i\ (1-r)^6\ (1-r')^6$; le rapport de ces deux intensités est donc $(1-r)^5\ (1-r')^5$, qui est égal au rapport de 15 à 23 donné par l'expérience; on en déduit $(1-r)\ (1-r') = 0{,}918$; par conséquent la proportion réfléchie par une réflexion extérieure et une intérieure est $1-0{,}918 = 0{,}082$, ou environ $\frac{1}{13}$, comme pour le sel gemme. Le cristal de roche taillé perpendiculairement à l'axe donne encore le même résultat. On peut donc tirer de là ces deux conséquences : 1° que le sel gemme n'absorbe qu'une proportion insensible de la chaleur qui le traverse; 2° que la réflexion perpendiculaire sur la première et la deuxième surface d'une plaque de sel, de verre ou de quartz, ne s'exerce que sur $\frac{1}{13}$ de la chaleur incidente.

234. Influence de l'épaisseur des plaques diathermanes, et composition des flux de chaleur émis par différentes sources ou transmis par différentes plaques. — Nous venons de constater ce fait remarquable, que le sel gemme n'absorbe aucune portion sensible de chaleur rayonnante, du moins jusqu'à l'épaisseur de 3 ou 4 centimètres; mais il est le seul corps qui possède cette diathermanéité absolue; toutes les autres substances absorbent des proportions plus ou moins grandes de chaleur, et ces absorptions varient avec l'épaisseur des plaques et la nature des sources calorifiques, suivant des lois très-compliquées.

Voici le tableau des résultats que présentent à cet égard le verre, le cristal de roche limpide ou enfumé, l'huile de colza, et l'eau distillée.

ÉPAISSEUR en MILLIMÈTRES.	VERRE DE SAINT-GOBAIN.			CRISTAL DE ROCHE LIMPIDE.			CRISTAL DE ROCHE ENFUMÉ.			HUILE DE COLZA.		EAU DISTILLÉE.	
	Lampe Locatelli.	Platine incandescent.	Cuivre à 400°.	Lampe Locatelli.	Platine incandescent.	Cuivre à 400°.	Lampe Locatelli.	Platine incandescent.	Cuivre à 400°.	Lampe Locatelli.	Platine incandescent.	Lampe Locatelli.	Platine incandescent.
0,5	77,5	62,1	14,4	78,6	69,5	14,8	81,7	70,0	15,4	64,0	32,0	25,1	8,7
1,0	73,3	51,5	9,9	76,8	65,1	11,3	78,6	65,0	12,3	48,1	22,8	19,3	5,7
1,5	70,4	46,1	6,7	74,8	62,5	9,7	»	»	»	41,0	18,2	16,0	4,2
2,0	68,2	42,8	5,0	73,3	60,6	8,7	75,1	60,3	9,1	36,1	16,3	13,9	3,2
2,5	66,0	»	»	72,5	»	»	»	»	»	32,7	»	»	»
3	65,3	38,3	2,9	71,8	57,6	7,3	73,1	57,4	7,8	30,6	13,6	11,4	2,0
4	63,4	35,8	2,0	70,8	55,3	6,6	71,4	54,8	7,0	27,8	12,0	10,0	1,5
5	62,0	34,0	1,6	70,2	53,3	6,0	»	»	»	25,7	10,8	9,1	1,1
6	60,9	32,3	1,4	69,8	51,4	5,3	»	»	»	23,9	9,8	8,6	1,0
7	60,0	30,9	1,2	69,5	49,8	5,0	»	»	»	22,6	8,9	8,2	0,8
8	59,2	29,7	1,1	69,3	48,4	4,6	»	»	»	21,8	8,1	8,0	0,6
9	»	»	»	»	»	»	»	»	»	21,2	7,5	7,8	0,5
10	»	»	»	»	»	»	»	»	»	21,0	7,1	7,7	0,4
11	»	»	»	»	»	»	»	»	»	20,9	6,7	7,7	0,3
50	»	»	»	»	»	»	»	»	»	12,5	2,1	2,4	0,0
86	»	»	»	»	»	»	59,0	35,0	0,7	»	»	»	»
100	»	»	»	»	»	»	»	»	»	8,1	1,2	1,3	0,0
150	»	»	»	»	»	»	»	»	»	6,1	»	0,7	0,0
200	»	»	»	»	»	»	»	»	»	5,3	»	»	»

Tous les nombres contenus dans ce tableau ne sont pas les résultats immédiats de l'expérience, parce qu'il n'a pas toujours été possible d'opérer sur des épaisseurs exactes de $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{2}$, $\frac{3}{2}$ millimètres, etc.; mais alors les nombres correspondant à ces épaisseurs ont été obtenus par des interpolations entre des nombres voisins.

Les expériences sur l'huile de colza ont été faites dans des tubes fermés par des plaques de sel gemme; mais, quand l'épaisseur de l'huile dépassait 3 millimètres, il était indifférent de fermer le tube avec du verre ou avec du sel.

Après avoir constaté que l'eau distillée agit sensiblement comme l'eau salée, il a été facile de reconnaître qu'une couche d'eau de $0^{mm},3$, produit le même effet, qu'elle soit renfermée dans des plaques de sel ou qu'elle le soit dans des plaques de verre.

Tous les résultats sont corrigés de la perte qui résulte des deux réflexions extérieure et intérieure : l'inetnsité du faisceau incident étant représentée par 100, et il se réduit en réalité à 92,3 par l'effet de la réflexion.

Pour les cinq substances, on voit que l'absorption est déjà très-considérable pour une épaisseur de $\frac{1}{2}$ millimètre, et qu'elle est d'autant plus grande que la température de la source est moins haute.

L'absorption totale augmente d'abord rapidement avec l'épaisseur, mais elle semble tendre vers une limite, car, en ajoutant des épaisseurs considérables, le faisceau transmis conserve à peu près la même intensité; il en résulte que le flux de chaleur de chaque source est composé d'éléments très-diversement absorbables : les uns n'exigeant que de très-faibles épaisseurs pour être complétement absorbés; les autres exigeant des épaisseurs plus grandes; les autres, enfin, pouvant résister à l'absorption. Mais cette composition de la chaleur rayonnante est variable avec la nature de la source qui la produit; les sources de basse température ayant, en général, une plus grande proportion d'éléments absorbables, du moins quand l'absorption se fait par les substances comprises dans le tableau.

234 *bis*. **Les rayons calorifiques les moins réfrangibles paraissent être les moins transmissibles.** — M. Melloni a été conduit à cette proposition par l'ensemble de ses recherches et particulièrement par la grande différence d'absorption que pré-

sentent les rayons calorifiques du spectre solaire, suivant qu'on les prend d'un côté ou de l'autre du rouge; les plus réfrangibles, pris entre le rouge et le violet, étant bien moins absorbés que les moins réfrangibles pris au dehors du rouge. Cette opinion est confirmée par les résultats suivants que MM. de La Provostaye et Desains ont obtenus en faisant passer des chaleurs de diverses sources au travers d'une même lame d'eau de 5 centimètres d'épaisseur, terminée par deux glaces minces et bien polies.

Tableau des proportions de chaleur transmise au travers d'une lame d'eau de 5 centimètres d'épaisseur.

Chaleur solaire totale.	0,58
Chaleur solaire obscure prise au dehors du rouge, autant que la limite du vert et du bleu est au dedans.	0,14
Chaleur solaire obscure plus éloignée.	0,00
Chaleur solaire ayant déjà traversé 25 centimètres d'eau.	0,92
Chaleur des charbons rendus incandescents par une forte pile.	0,24
Chaleur de la craie exposée au chalumeau d'oxygène et de vapeur d'éther.	0,20
Chaleur de la lampe Locatelli ou de la lampe d'Argand à cheminée.	0,10
Chaleur de la lampe à alcool salé.	0,02
Chaleur de la lampe d'Argand qui a traversé une lentille de 10 centimètres d'eau.	0,51

Les mêmes physiciens ajoutent que dans un beau spectre de la lumière électrique, on peut trouver la chaleur jusque dans le bleu, tandis que dans les spectres imparfaits des lampes, dont la température est moins élevée, on ne trouve des signes de chaleur que dans le rouge et au dehors du rouge.

235. Diathermansie ou thermanisme. — Lorsqu'on examine la composition de la chaleur, non plus en elle-même et d'une manière absolue, mais d'une manière relative et par rapport aux milieux qu'elle traverse, on est conduit à cette conséquence importante, savoir : que l'action des corps diathermanes sur la chaleur, est analogue, en général, à l'action que les corps transparents et colorés exercent sur la lumière. En effet, ce qui caractérise les milieux colorés, c'est d'exercer de préférence leur absorption sur telle ou telle couleur; en sorte, par exemple, que, si un verre ne laisse passer que le rouge simple, un autre verre pareil qu'on mettrait derrière lui n'absorberait presque rien, tandis qu'un verre violet ne laisserait presque rien passer : si les verres colorés, au lieu de rendre simple la lumière qui les traverse, lui laissent au contraire des teintes composées, on obtient encore des résultats analogues, mais dont l'analyse est un peu compliquée. Nous allons voir qu'il en est de même des corps

Digitized by Google

diathermanes. Examinons d'abord séparément les cinq substances du tableau précédent : dès que la chaleur a traversé une épaisseur de 5 ou 6 millimètres, elle est *épurée* ou *thermanisée* pour chacune de ces substances ; non-seulement elle devient plus apte à les traverser, mais elle n'éprouve plus de leur part que de très-faibles absorptions ; si bien qu'une nouvelle épaisseur de la même substance agit alors sur le faisceau thermanisé presque comme le sel gemme agit sur toute espèce de chaleur, ou comme un verre rouge agit sur de la lumière colorée qui vient de traverser un autre verre rouge. Si maintenant, sur un faisceau thermanisé par une substance, on fait agir une autre substance diathermane, voici ce que l'on observe : le cristal de roche, par exemple, agit sur la chaleur qui vient de traverser le verre à peu près comme il agirait sur de la chaleur naturelle, c'est-à-dire qu'il en absorbe une partie considérable, et que cette absorption diminue rapidement à mesure que l'épaisseur augmente. Le verre agit de même sur la chaleur qui a traversé le cristal de roche ; ces deux substances agissent donc sur la chaleur comme deux verres colorés de nuances différentes agissent sur la lumière ; bien entendu toutefois, que l'un n'absorbe pas tout ce que l'autre laisse passer. C'est à cette propriété que possèdent les substances différentes de choisir dans la chaleur des éléments différents pour les absorber, que M. Melloni donne le nom de *diathermansie ;* nous proposons de l'appeler simplement *thermanisme ;* d'appeler *thermanisantes* les substances qui choisissent ainsi des rayons distincts pour les absorber de préférence, et d'appeler chaleur *thermanisée* celle qui a été modifiée par les substances thermanisantes, comme on appelle lumière colorée celle qui a été modifiée par les substances colorantes. Ainsi le sel gemme est diathermane, et non pas thermanisant, puisqu'il n'absorbe rien, et la chaleur qui l'a traversé reste chaleur naturelle, c'est-à-dire non thermanisée, puisqu'elle possède tous ses éléments absorbables. D'autres substances pourraient être moins diathermanes que le sel, sans être thermanisantes : il suffirait pour cela qu'elles absorbassent en même proportion tous les éléments divers de la chaleur naturelle. Enfin, toutes les sources ne donnent pas nécessairement de la chaleur qui doive être appelée chaleur naturelle ; il peut y avoir des sources dont la chaleur soit thermanisée, comme il y a des flammes dont la lumière est colorée ; les sources mêmes dont nous nous sommes

Digitized by Google

servis sont dans ce cas, puisqu'une même substance thermanisante n'agit pas de la même manière sur les chaleurs qu'elles émettent. Il faudrait même se garder de conclure d'une manière absolue que la chaleur qui provient des sources les plus chaudes est toujours celle qui contient le moins d'éléments absorbables; car M. Melloni a constaté récemment que le sel gemme, convenablement enfumé à la flamme d'une bougie, absorbe en plus grande proportion la chaleur qui émane des sources les plus chaudes (*Comptes rendus*, t. IX).

Enfin, tout semble indiquer qu'il n'y a réellement aucune lumière chaude, ni aucune chaleur lumineuse; car, en combinant convenablement des substances thermanisantes, comme, par exemple, le verre vert et l'alun, on arrive à absorber presque toute la chaleur, sans presque atténuer l'éclat de la lumière, comme on parvient en sens contraire avec des verres noirs ou du cristal de roche enfumé, à absorber presque toute la lumière du soleil, en laissant passer une proportion considérable de sa chaleur.

Nous ajouterons encore que, dans les combinaisons ou superpositions des substances thermanisantes, l'effet produit doit être indépendant de l'ordre de superposition; ce qui est confirmé par l'expérience.

236. Pouvoir diffusif. — Après l'avoir défini (**229**), nous allons rapporter les expériences par lesquelles M. Melloni a essayé d'en déterminer la valeur. L'appareil est celui de la planche 46 (Fig. 5); seulement il prend ici une autre disposition qui est représentée en plan et plus en petit dans la figure 1 (Pl. 47). La pile p est munie de son réflecteur b, et elle est portée sur une sorte d'alidade mobile autour du centre t, de manière à pouvoir prendre alternativement la position p et la position symétrique p'. Sur la ligne su et à une certaine distance du centre t, est un écran v; la source de chaleur se dispose en f; au-dessus du centre t, et perpendiculairement à su on place un disque d de carton mince, bien plan, de 20 centimètres de diamètre, à une hauteur telle que son centre corresponde exactement à l'axe de la pile. Chauffé par le rayonnement du foyer f, ce disque se met vite en équilibre de température; alors on observe les effets produits par sa face postérieure sur la pile portée en p', et par sa face antérieure sur la pile portée en p, les angles stp' et utp étant égaux. On opère ainsi comparativement sur deux disques tout à fait pareils; seulement l'un a ses deux faces noircies au

Digitized by Google

noir de fumée, tandis que l'autre a une face naturelle et une face noircie : c'est celui-ci que nous appellerons disque blanc, parce que sa face blanche est toujours sa face antérieure, c'est-à-dire celle qui est tournée vers le foyer. Voici maintenant les résultats qui ont été obtenus avec quatre sources de chaleur : A, métal chauffé à 400° ; B, platine incandescent ; C, lampe de Locatelli ; D, rayons de la lampe de Locatelli transmis au travers du verre. On a varié la distance des foyers au disque, afin d'avoir toujours une déviation voisine de 12° pour effet de la face postérieure du disque noir ; cet effet obtenu, on portait la pile en *p* pour faire la seconde observation, et, sans rien changer au foyer, on substituait le disque blanc au disque noir, pour le soumettre de suite au même rayonnement et à la même épreuve. Ces quatre observations sur chaque source ont été répétées plusieurs fois. On donne ici les résultats moyens ; la colonne des forces s'obtient en représentant par 100 la première déviation de chaque série.

SOURCES de CHALEUR.		A		B		C		D	
		DÉVIATION.	FORCE.	DÉVIATION.	FORCE.	DÉVIATION.	FORCE.	DÉVIATION.	FORCE.
Disque noir. .	face postérieure.	12,4	100	12,3	100	11,8	100	12,2	100
	face antérieure.	14,6	118	14,3	117	14,1	119	14,4	118
Disque blanc.	face postérieure... ..	11,5	93	10,3	84	8,1	69	5,7	46
	face antérieure.	16	129	18,7	152	21,0	181	26,9	220

Les conditions de l'expérience sont telles, que si la face blanche du second disque avait le même pouvoir absorbant que la face noire du premier, les déviations produites par les faces postérieures devraient aussi être les mêmes, car les deux expériences sont identiques. Mais les différences sont énormes et variables avec la nature de la source calorifique ; donc la face blanche absorbe moins de chaleur que la face noire, et cette inégalité dépend de la nature même de la chaleur. Que devient cette chaleur incidente qui n'est pas absorbée par la face blanche ? La

Digitized by Google

dernière colonne horizontale l'indique ; on voit qu'elle est renvoyée en avant, et M. Melloni s'est assuré qu'elle est renvoyée dans toutes les directions, c'est-à-dire, qu'il n'y a nul effet de réflexion régulière. Il y a donc une réflexion irrégulière, variable avec la nature des rayons incidents, ou un pouvoir diffusif. M. Melloni se prononce pour cette dernière opinion, qui me paraît en effet la plus probable ; cependant, pour lever tous les doutes, il serait nécessaire d'examiner la nature de ces rayons dispersés en avant, et de voir s'ils retiennent les propriétés des rayons incidents, ou s'ils ont acquis des propriétés nouvelles.

En attendant, il est bien établi, dès à présent, que le noir de fumée et les métaux ont des pouvoirs absorbants dont les rapports paraissent invariables, quelle que soit la nature des rayons calorifiques incidents ; tandis qu'il n'en est pas de même du carton blanc et des autres corps analogues, lorsqu'on les compare au noir de fumée ; ils ont un pouvoir absorbant presque complet pour les rayons émis par les sources à basse température, et ils rejettent au contraire une portion considérable des rayons calorifiques émis par le soleil et par les sources à haute température.

Enfin, il est bien établi que le noir de fumée absorbe toujours tous les rayons de chaleur, quelle que soit leur origine, comme il absorbe tous les rayons de lumière.

Il y a une autre diffusion qui a été aussi étudiée par M. Melloni, c'est la diffusion par transmission, qui a lieu lorsque les rayons sortent des substances diathermanes ou thermanisantes par des surfaces dépolies. Ces surfaces dispersent en effet la chaleur, comme il était facile de le prévoir ; mais rien ne prouve que ce soit autrement que par une simple réfraction qui jette les rayons dans tous les sens. En effet, les rayons qui sortent ains du sel gemme ou du verre ont toutes les propriétés des rayons qui sortiraient par des surfaces polies de ces deux substances : ceux du sel ont tous les caractères de la source qui les a émis ; ceux du verre sont thermanisés comme ils doivent l'être ; tout paraît se réduire au changement de direction. Mais, ce qu'il y a de très-étonnant, c'est qu'u face de sel noircie au noir de fumée paraît n'imprimer aux rayons émergents aucune déviation de cette nature. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. LXXV, p. 879 et 380.)

Digitized by Google

§ 3. *Lois du refroidissement, quantités de chaleur émises, et conditions générales de l'équilibre de température.*

Depuis Newton, qui, le premier, a posé quelques principes sur le refroidissement des corps, les plus habiles physiciens ont fait des expériences et des recherches mathématiques sur ce sujet. Cependant la question restait enveloppée de difficultés insurmontables, et l'on n'avait fait que quelques pas incertains vers sa solution, quand Dulong et Petit parvinrent à la résoudre d'une manière complète, pour une étendue assez considérable de l'échelle thermométrique. Leur travail, qui fut couronné par l'Académie des sciences en 1818, est un modèle d'exactitude et d'invention, que les jeunes physiciens ne peuvent étudier avec trop de soin. MM. de La Provostaye et Desains, en suivant la même marche, ont ajouté encore à nos connaissances sur ce sujet, particulièrement en ce qui touche au pouvoir refroidissant des gaz. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXII, ann. 1848.)

237. Loi du refroidissement dans le vide. — Pour faire les observations sur le refroidissement, et pour en déterminer les lois, Dulong et Petit ont employé les procédés suivants : *a* (Fig. 18), vase de cuivre rempli d'eau que l'on maintient à une température constante par l'agitation et par un renouvellement convenable ; *b*, ballon de cuivre de 30 centimètres de diamètre noirci en dedans, et suspendu au milieu du bain où il est retenu par les traverses *c* ; *d*, obturateur de verre épais dont les deux faces sont planes ; l'une de ces faces s'applique sur les bords larges et bien dressés du ballon, l'autre reçoit le gros tube de verre *e*, comme la platine de la machine pneumatique reçoit une cloche ; ce tube, ou plutôt cette cloche *e*, est munie d'un robinet *f*; *g*, tube de plomb faisant communiquer le ballon à la machine pneumatique, dont on a seulement figuré la platine *h* ; *k*, tube de chlorure de calcium destiné à dessécher le gaz qui vient de la grande cloche *l* dans le ballon, lorsqu'on veut observer le refroidissement dans les différents gaz. Les corps que l'on soumet au refroidissement sont de gros thermomètres à réservoir sphérique, l'un ayant 3 centimètres, et l'autre 6 centimètres de diamètre ; leurs tubes sont très-fins dans toute la longueur qui doit être enfermée dans le ballon ; mais la partie supérieure est large, afin que la dilatation correspondante à 1° n'y occupe pas plus de 1 millimètre $\frac{1}{2}$. Ces thermomètres sont fixés par un bou-

Digitized by Google

chon dans l'obturateur *d*, et s'enlèvent avec lui : on les porte à 100, 200, 300°, en les chauffant avec les précautions qui sont indiquées dans la figure 19.

Lorsqu'ils sont arrivés à la température convenable, on les porte rapidement dans le ballon; on pose la cloche *e* sur l'obturateur; on fait le vide rapidement, et, quelques instants après, on note le *zéro* du temps et la température correspondante du thermomètre soumis au refroidissement : l'excès de cette température sur celle de l'enceinte est l'excès initial; puis, le refroidissement continuant, on observe les excès de température à des instants plus ou moins rapprochés, en lisant toujours sur le chronomètre l'instant précis qui correspond à l'excès observé. On obtient ainsi, pour chaque expérience, une longue série de résultats. Nous rapporterons comme exemple la série suivante, où la température de l'enceinte était de 12°.

Temps.	Températures observées.	Excès de température.
0	50	38
2′ 38″	48	36
5 26	46	34
8 23	44	32
11 32	42	30
14 53	40	28
18 31	38	26
22 25	36	24
26 41	34	22
31 18	32	20

Trouver la loi du refroidissement, c'est découvrir la relation mathématique qui existe entre ces résultats, non pas pour une expérience, mais pour toutes les expériences analogues à celle-ci.

Newton avait supposé que cette loi pouvait être exprimée par la formule

$$t = cb^{-z},$$

c étant l'excès initial, *z* le temps écoulé, *t* l'excès de température correspondant, et *b* une constante particulière variable d'un corps à un autre.

La vitesse *v* du refroidissement n'est autre chose que le rapport qui existe entre l'abaissement de température dans un temps très-court, et ce temps lui-même, ou le coefficient différentiel de l'excès de température par rapport au temps, c'est-à-dire $\frac{-d}{dz}$ (parce que la température diminue à mesure que le temps augmente); d'après cela, son expression se déduit aisé-

Digitized by Google

ment de la formule précédente par une simple différentiation, et l'on en tire

$$v = t \log' b.$$

Sur quoi il faut remarquer que $\log' b$ est ici un logarithme népérien; mais quand on connaît le logarithme décimal de b, ou $\log b$, il suffit de le multiplier par le module M, dont la valeur est, comme on sait, 2,302585, pour en faire un logarithme népérien; ainsi

$$\log' b = M \log b,$$

et l'expression de la vitesse devient

$$v = (M \log b).\, t.$$

La loi de Newton est donc exprimée par les deux équations

$$t = cb^{-z}; \quad v = (M \log b).\, t.$$

La première est *celle des temps;* elle exprime la relation qui existe entre les excès de température et les temps écoulés; et elle montre que le temps z croissant en progression arithmétique, ou par intervalles égaux, l'excès t décroît au contraire en progression géométrique. En effet, pour

$$z = 0; \quad 1; \quad 2; \quad 3,$$

on a

$$t = c;\ cb^{-1};\ cb^{-2};\ cb^{-3},$$

progression dont le premier terme est c, et dont la raison est b^{-1}.

La seconde équation est *celle des vitesses;* elle exprime que les vitesses sont proportionnelles à l'excès de température, et que le coefficient de cette proportionnalité est $M \log b$.

Pour savoir si la loi de Newton est en effet la loi générale du refroidissement, il suffit de l'appliquer aux expériences, et de voir avec quelle exactitude elle les représente. Nous allons indiquer comment se font ces applications. b est la seule chose qui soit inconnue dans nos formules, et qui caractérise le corps sur lequel on opère; sa valeur se tire de la première équation qui donne

$$\log b = \frac{\log c - \log t}{z}.$$

Dans la série que nous avons donnée pour exemple, $c = 38$; et

Digitized by Google

si nous prenons ensuite la dernière observation, nous aurons en même temps

$$t = 20 \text{ et } z = 31'\ 18'' = 31,3,$$

ce qui donne $\log b = 0,0089058.$

En choisissant ainsi la minute pour unité de temps, la valeur numérique de v est l'abaissement de température pendant 1'; si l'on avait choisi la seconde pour unité, en faisant $z = 1878''$, la vitesse serait le nombre des degrés perdus pendant 1".

Si la loi de Newton est rigoureuse, on devrait retomber exactement sur cette même valeur de $\log b$, en prenant l'une quelconque des observations du tableau, la deuxième, par exemple, pour laquelle $t = 36$ et $z = 2'\ 38''$; ou la cinquième, ou toute autre. Ou bien, ce qui revient encore au même, avec cette valeur de $\log b$, on peut calculer successivement tous les excès correspondants aux diverses valeurs de z, savoir: 2' 38", 5' 26", etc., et les comparer aux excès observés 36°, 34°, etc. Si tous ces excès sont fidèlement reproduits, la loi est exacte, sinon elle n'est qu'une approximation plus ou moins admissible. Or, en faisant ces calculs, on trouve que les résultats ne s'écartent pas trop de la vérité; ainsi, dans ces limites, la loi de Newton paraît très-applicable, et les valeurs des vitesses que l'on tirerait de la deuxième équation, seraient bien les vitesses de refroidissement.

Mais quand les excès de température dépassent 40°, les écarts deviennent rapidement croissants, et il n'est plus possible de représenter toute une série avec la même valeur de $\log b$.

Ce fait avait déjà été signalé par Martine et par Erxleben; aussi, dès leurs premières recherches, Dulong et Petit avaient-ils modifié ces formules pour avoir la possibilité d'enchaîner et de comparer ces résultats. Ils avaient adopté

$$t = cb^{mz+nz^2}$$

pour la formule qui lie les excès au temps, et par suite

$$v = t(m + 2nz)\text{M.}, \log b$$

pour la formule qui lie les vitesses aux excès.

Alors, pour mettre à l'épreuve ces nouvelles formules, on prend dans la série des résultats qui composent, comme nous venons de le voir, une observation de refroidissement, trois excès qui ne soient pas trop éloignés l'un de l'autre, et les trois temps correspondants, et, en les substituant dans la première

Digitized by Google

formule avec l'excès initial c, on a, pour calculer les trois constantes b, m, n, trois équations de la forme

$$\log t - \log c = (mz + nz^2) \log b;$$

en les divisant deux à deux, on fait disparaître $\log b$, et on obtient deux équations entre m et n; ces deux constantes une fois connues, on tire aisément la valeur de $\log b$, au moyen de l'une des premières équations. Alors la deuxième formule donne les vitesses de refroidissement qui correspondent aux différents excès. Toutefois, les séries qui embrassent un grand nombre d'observations, qui s'étendent, par exemple, depuis les excès de 250 ou 300°, jusqu'aux excès de 20 ou 30°, ne peuvent pas être calculées avec les mêmes constantes. Dans ce cas, on les partage en trois ou quatre portions de 300 à 200, de 200 à 100, et de 100 à 20, et l'on calcule séparément les constantes pour chacune de ces portions.

On comprend que, en procédant de la sorte, on arrive à obtenir des vitesses très-exactes pour toute l'étendue de chaque série : ce sont ces vitesses que nous appellerons *vitesses observées*, parce qu'en effet elles se déduisent immédiatement de l'observation.

Voici maintenant les résultats qui ont été obtenus pour cinq séries faites avec le même thermomètre, ayant la même surface vitrée, les mêmes excès sur la température de l'enceinte, mais l'enceinte elle-même ayant des températures différentes pour chaque série, savoir, 0 pour la première, 20° pour la deuxième, etc.

EXCÈS de température du thermomètre, surface vitreuse.	VITESSE DE REFROIDISSEMENT.				
	l'enceinte à 0°.	l'enceinte à 20°.	l'enceinte à 40°.	l'enceinte à 60°.	l'enceinte à 80°.
240°	10°,69	12°,40	14°,35	»	»
220	8 ,81	10 ,41	11 ,98	»	»
200	7 ,40	8 ,58	10 ,01	11°,64	13°,45
180	6 ,10	7 ,04	8 ,20	9 ,55	11 ,05
160	4 ,89	5 ,67	6 ,61	7 ,68	8 ,95
140	3 ,88	4 ,57	5 ,32	6 ,14	7 ,19
120	3 ,02	3 ,56	4 ,15	4 ,84	5 ,64
100	2 ,30	2 ,74	3 ,16	3 ,68	4 ,29
80	1 ,74	1 ,99	2 ,30	2 ,73	3 ,19
60	»	1 ,40	1 ,62	1 ,88	2 ,17

Digitized by Google

On voit que, pour le même excès, la vitesse de refroidissement n'est pas indépendante de la température de l'enceinte. Cette vitesse croît rapidement à mesure que la température de l'enceinte s'élève. Dans l'enceinte à 80°, par exemple, elle est presque double de ce qu'elle est dans l'enceinte à 0. De plus, il est facile de reconnaître que le rapport des vitesses de deux séries est constant pour tous les excès, et que, si on le représente par r en comparant la deuxième série à la première, il devient r^2 en comparant la troisième à la première, r^3 et r^4 en comparant de même la quatrième et la cinquième à la première. Ainsi, quand la température de l'enceinte croît en progression arithmétique dont la raison est 20°, la vitesse de refroidissement croît en progression géométrique dont la raison est r, la valeur de r étant 1,165.

C'est ce résultat fondamental qui a conduit Dulong et Petit à la vraie loi du refroidissement.

Remarquons, en effet, que la vitesse que donne l'observation n'est autre chose que la différence entre la *vitesse absolue* de refroidissement que le corps éprouverait s'il ne recevait rien, et la *vitesse de réchauffement* que lui donne l'enceinte par la chaleur qu'elle lui renvoie. Or, à l'équilibre, la vitesse de réchauffement communiquée par l'enceinte étant égale à la vitesse absolue de refroidissement du corps, et l'équilibre s'établissant ainsi à toute température, il en résulte évidemment que ces deux vitesses contraires sont soumises à la même loi, et que cette loi ne peut différer de celle que nous venons de constater pour la vitesse observée.

Soit donc m la vitesse absolue de refroidissement du corps pour la température 0, $ma^{t+\theta}$ sera sa vitesse pour la température $t+\theta$. Soit k la vitesse absolue de refroidissement de l'enceinte supposée à la température 0, c'est-à-dire, celle qui aurait lieu si le calorique, au lieu de sortir d'un point de sa paroi pour aller tomber sur un autre, était détruit ou absorbé à l'instant même où il sort; toute cette chaleur, partie de tous les points de l'enceinte, n'arrive pas au corps; en réalité, il n'en reçoit et n'en absorbe qu'une partie qui est capable de lui donner une vitesse de réchauffement égale à m. A la température θ, l'enceinte aurait une vitesse absolue de refroidissement ka^{θ}, et la vitesse de réchauffement que le corps en recevrait serait alors ma^{θ}. Ainsi, en définitive, quand l'enceinte est à la température

θ et le corps à la température $t+\theta$, sa vitesse réelle de refroidissement v est égale à $ma^{t+\theta}-ma^{\theta}$, d'où :

$$v=ma^{\theta}(a^{t}-1),$$

qui est la véritable expression de la loi du refroidissement.

Pour la vérifier par l'expérience, il suffit de prendre les séries que nous avons rapportées, ou d'autres pareilles, de déterminer d'abord a et m, et ensuite en substituant à t les divers excès observés, d'en déduire les valeurs de v correspondantes, pour comparer ces *vitesses calculées* à celles qui résultent de la formule $v=t(m+2nz)\log b$, et du fractionnement des séries, et que nous avons appelées *vitesses observées*.

D'abord a s'obtient aisément, puisque nous avons vu qu'en faisant croître de 20° la température θ de l'enceinte, le rapport r des vitesses était 1,165 ; il en résulte $a^{20}=1,165$, et $a=1,0077$; de plus, en comparant d'autres séries obtenues avec d'autres corps refroidissants, on retombe toujours sur cette même valeur numérique de a; ce qui permet de conclure que dans la loi du refroidissement la valeur de a est complétement indépendante de la nature des corps.

Ensuite, pour avoir m, on substitue pour v, a, θ et t, quelques-unes des valeurs prises dans les séries ; on prend la moyenne des résultats auxquels elles conduisent pour m, qui reste alors la seule inconnue. Les séries que nous avons rapportées donnent ainsi $m=2,037$, et toutes les séries que l'on pourra faire avec le même instrument conduiront à la même valeur; mais cette valeur change en passant d'un corps refroidissant à un autre.

Dans la loi du refroidissement, a est donc une constante absolue, et m la constante qui caractérise les corps soumis au refroidissement. Mais, pour un même corps dont on change seulement la surface, les vitesses étant évidemment proportionnelles aux quantités de chaleur perdues, et par conséquent aux pouvoirs émissifs, il en résulte que la valeur de m est elle-même proportionnelle au pouvoir émissif du corps qui se refroidit. C'est ce que Dulong et Petit ont vérifié sur un même thermomètre, dont les refroidissements ont été observés dans deux états : avec sa surface vitreuse naturelle, et avec cette surface couverte de feuilles d'argent. Dans le premier cas, m s'est trouvé égal à 2,037, et dans le deuxième, à 0,357; ce qui donne 5,17 pour le rapport des pouvoirs émissifs du verre et de l'argent

Digitized by Google

mat. Cette expérience est importante, parce qu'elle constate que la loi du refroidissement s'applique avec la même exactitude aux corps dont les pouvoirs émissifs sont les plus différents, ce qui seul suffit pour établir ce principe : que les rapports des pouvoirs émissifs des différents corps ne changent pas avec la température, du moins dans toute l'étendue des limites où la loi du refroidissement est vraie.

Quand l'excès t n'est pas très-considérable, on peut, dans le développement de a^t, négliger le terme $\frac{1}{2}(t \log' a)^2$ et les suivants, et l'on a alors :

$$v = ma^\theta \log' a . t,$$

c'est-à-dire que dans ce cas la vitesse de refroidissement est proportionnelle à l'excès de température, conformément à la loi de Newton. Mais, il est facile de voir que cette loi ne peut pas être exacte pour des excès de température qui dépassent 30° ; car le logarithme décimal de a étant 0,0033313, et son logarithme népérien 0,0076676 ; pour $t = 30$, $\frac{1}{2}(t \log' a)^2$ est à peu près $\frac{1}{40}$; d'où il suit qu'en suivant la loi de Newton on commettrait sur la vitesse une erreur plus grande que $\frac{1}{40}$ de sa valeur : pour un excès de 50°, l'erreur serait de plus de $\frac{1}{10}$.

L'expression générale de la vitesse de refroidissement étant connue, et cette expression n'étant autre chose que le coefficient différentiel de la variation de température par rapport au temps, il est facile, par une intégration très-simple, de passer de *la loi de la vitesse* à *la loi du temps*. Mais nous devons nous borner ici à donner cette loi du temps comme un résultat du calcul ; elle est exprimée par la formule suivante :

$$z = \frac{1}{ma^\theta \log a} . \log \left[\frac{a^t(a^s - 1)}{a^s(a^t - 1)}\right].$$

m, a, θ et t désignent les mêmes choses que dans la loi de la vitesse ; s représente l'excès initial ; c'est-à-dire l'excès de température pour lequel le temps est 0, et à partir duquel, par conséquent, le temps z doit être compté.

Puisque cette formule n'est qu'une conséquence nécessaire de celle de la vitesse, elle se trouve indirectement vérifiée par la vérification de la première : cependant, si l'on voulait en tirer des vérifications directes, il suffirait de déterminer les constantes m et a, d'y substituer les excès t, et d'en déduire les valeurs des temps z, pour les comparer à ceux de l'observation.

Digitized by Google

238. Loi du refroidissement dans les gaz. — Lorsqu'un corps est soumis au refroidissement dans une enceinte remplie de gaz, il perd sa chaleur par deux causes, par le rayonnement et par le contact du gaz lui-même, dont les courants se renouvellent avec plus ou moins d'activité. Pour démêler l'influence de ces deux causes, Dulong et Petit ont fait d'abord diverses séries d'expériences avec le même thermomètre, mais en donnant à sa surface des pouvoirs émissifs très-différents, par exemple, en la laissant vitrée, et en la recouvrant de feuilles d'argent. Or, si des vitesses observées dans le gaz on retranche les vitesses observées dans le vide, on retrouve identiquement les mêmes résultats, quel que soit l'état de la surface; il est donc permis de conclure que ces résultats identiques expriment réellement la vitesse due au contact du gaz lui-même, et qu'ainsi ces vitesses sont tout à fait indépendantes de l'état de la surface des corps.

Ce principe fondamental une fois établi, il devient facile de déterminer les vitesses de refroidissement dans tous les gaz à des pressions et à des températures différentes, puisqu'il suffit d'avoir la constante m du thermomètre, de calculer ses vitesses de refroidissement dans le vide, et de les retrancher des vitesses observées dans le gaz. C'est en procédant de la sorte que Dulong et Petit ont trouvé, pour l'expression v' de vitesse de refroidissement due au contact seul d'un fluide élastique n'ayant d'autre mouvement que celui qui résulte des courants produits par les différences de température,

$$v' = g . h^c . t^b ;$$

b est le même pour tous les thermomètres et pour tous les gaz, et égal à 1,233; c est le même aussi pour tous les thermomètres, mais il varie d'un gaz à un autre; il est égal à 0,45 pour l'air, à 0,38 pour l'hydrogène, à 0,517 pour l'acide carbonique, et à 0,501 pour le gaz oléfiant; h est l'élasticité du gaz; t est l'excès de température; g est un coefficient qui change avec la nature du gaz, et aussi avec la nature du corps soumis au refroidissement. Pour le thermomètre qui servait aux expériences, on avait pour g les valeurs suivantes: 0,0092 dans l'air; 0,0318 dans l'hydrogène; 0,0089 dans l'acide carbonique; et 0,0123 dans le gaz oléfiant. Ces valeurs supposent que les températures t sont exprimées en degrés centigrades, et l'élasticité h en colonnes de mercure, dont le mètre est l'unité. A l'aide de ces

Digitized by Google

données, on pourrait comparer les pouvoirs refroidissants des différents gaz pour chaque pression. L'hydrogène comparé à l'air donnerait, par exemple,

$$\frac{318}{92} \cdot h^{0,38-0,45},$$

à la pression ordinaire $h = 0,76$; d'où il résulte que le pouvoir refroidissant de l'hydrogène est presque trois fois et demie plus grand que celui de l'air. A quoi tient cette énorme différence? Tout annonce qu'elle dépend surtout de la plus grande mobilité des molécules de l'hydrogène; car, s'il y avait une influence des éléments chimiques, elle se ferait sentir, sans doute, par une adhésion ou par un contact plus ou moins intime des molécules du gaz avec la surface du corps qui se refroidit, et alors les thermomètres vitreux et argentés n'auraient pas donné les mêmes résultats.

La loi de refroidissement, dont nous venons de donner l'expression générale, est très-complexe; il est, d'ailleurs, présumable qu'elle ne s'appliquerait pas dans l'air libre, parce que les courants s'y établissent tout autrement que dans un ballon sphérique et étroit. Aussi, lorsque, dans les expériences ordinaires, on doit recourir à des formules de refroidissement dans l'air, soit pour faire des corrections, soit pour un autre objet, il y a presque nécessité d'employer la loi de Newton, et alors on détermine les constantes comme nous l'avons indiqué.

Dans un excellent travail sur ce sujet, MM. de La Provostaye et Desains ont fait voir que les lois précédentes doivent être modifiées, même dans une enceinte vide, quand les pouvoirs réfléchissants des thermomètres deviennent considérables, et surtout dans une enceinte remplie de gaz, quand cette enceinte change de forme ou quand elle prend de moindres dimensions. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, 3ᵉ série, t. XVI et XXII.)

239. Équilibre d'un thermomètre dans une enceinte vide dont toutes les parties ne sont pas à la même température. —Soient 1 la surface totale de l'enceinte sphérique, k la portion de cette enceinte qui se trouve à la température s, et $1-k$ la portion qui est à la température θ; nous admettrons, pour plus de simplicité, que leur pouvoir réfléchissant est nul. Au centre de cette enceinte, le thermomètre devra, pour l'équilibre, prendre au-dessus de θ une température inconnue t, qu'il s'agit de déterminer.

Sa température étant $t+\theta$, sa vitesse absolue de refroidissement est $ma^{t+\theta}$; mais, de la part de la portion $1-k$ de l'enceinte, il reçoit une vitesse de réchauffement $m(1-k)a^{\theta}$, et, de la part de la portion k, une vitesse de réchauffement mka^{θ}; sa vitesse définitive de refroidissement est donc :

$$ma^{t+\theta}-m(1-k)a^{\theta}-mka^{\theta}.$$

Pour l'équilibre, il faut que cette vitesse soit nulle ; ce qui donne, pour déterminer t, la relation

$$a^{t}=1-k+ka^{\theta-\theta}.$$

Au lieu d'être sphérique, l'enceinte peut être cylindrique ; seulement il faut alors évaluer k convenablement.

C'est d'après ce principe que j'avais fait, en 1824, de nombreuses expériences pour déterminer la température des corps par leur rayonnement, dans les limites de température où ces formules sont applicables.

240. Expression de la quantité totale de chaleur émise par les corps. (Extrait de mon Mémoire, *Comptes rendus de l'Académie*, 1838.) — Un corps, dont le pouvoir émissif est f, et dont la température est $t+\theta$, émet dans l'unité de temps par l'unité de surface une quantité totale de chaleur, qui est exprimée par la formule :

$$e=g\,.f\,.a^{t+\theta}.$$

g étant une constante commune à tous les corps sans distinction, sa valeur est 1,146, lorsqu'on prend le centimètre carré pour unité de surface, et la minute pour unité de temps; a est toujours égal à 1,0077.

Supposons, en effet, ce corps sphérique, d'une surface s, au centre d'une enceinte pareillement sphérique, d'une surface s', ayant une température θ, et émettant par l'unité de surface dans l'unité de temps une quantité de chaleur e', son pouvoir émissif étant total et égal à 1. La quantité de chaleur émise par le corps est es; celle qui est émise par l'enceinte est $e's'$, dont le corps reçoit $e's'\sin^2\omega$, et absorbe $e'fs'\sin^2\omega$.

La perte réelle du corps en quantité de chaleur est donc $es-e'fs'\sin^2\omega$; ou $es-e'sf=s(e-e'f)$; ou enfin, en mettant pour e sa valeur précédente et pour e' sa valeur ga^{θ}, puisque pour l'enceinte $f=1$,

$$sgf(a^{t+\theta}-a^{\theta}).$$

Digitized by Google

Soient maintenant p le poids du corps et c sa capacité pour la chaleur : pour chaque unité de chaleur qu'il perd, sa température s'abaisse de $\frac{1}{cp}$; par conséquent, pour la perte de chaleur précédente, son abaissement de température dans l'unité de temps ou sa vitesse de refroidissement sera :

$$\frac{sgf}{c} \cdot (a^{t+\theta} - a^{\theta}).$$

Pour que cette formule coïncide avec celle de Dulong et Petit il suffit de faire :

$$m = \frac{sgf}{cp}.$$

Or, la valeur de m étant en effet en raison directe de la surface du corps et de son pouvoir émissif, et en raison inverse de son poids et de sa capacité, il faut bien que l'expression de e soit rigoureuse.

C'est d'après les valeurs de m, f, c et p, tirées des expériences de Dulong et Petit, que l'on conclut $g = 1,146$.

Il est facile de voir aussi qu'un corps qui perdrait sa chaleur sans en recevoir, mettrait, pour tomber de la température s à la température t, un nombre z de minutes exprimé par la formule :

$$z = \frac{c \cdot p}{s \cdot g \cdot f \cdot \log a} \cdot \left(\frac{a^{s-t} - 1}{a^{s}}\right).$$

241. Équilibre de température des corps protégés par une enveloppe diathermane (Extr. de mon Mém., *Comptes rendus de l'Académie*, 1838). — Soient s, s'', s', les surfaces d'un corps, d'une enveloppe diathermane et d'une enceinte concentrique et sphérique, l'enveloppe est entre le corps et l'enceinte; soient e, e'', e', les quantités de chaleur émises dans l'unité de temps par l'unité de chacune des trois surfaces; soient b le pouvoir absorbant que l'enveloppe diathermane exerce sur la chaleur émise par le globe, et b' le pouvoir absorbant qu'elle exerce sur la chaleur émise par l'enceinte.

Dans l'unité de temps, le globe émet une quantité de chaleur es : une portion bes est absorbée par l'enveloppe, et une portion $(1 - b)\,es$ traverse l'enveloppe pour arriver à l'enceinte.

L'enceinte émet une quantité de chaleur $e's'$; une portion

Digitized by Google

$e's' \sin^2 \omega$ tombe sur l'enveloppe diathermane (ω est le demi-angle sous lequel l'enceinte voit l'enveloppe); celle-ci en absorbe une portion $e's'(1-b)\sin^2\omega$.

L'enveloppe émet une quantité de chaleur $e''s''$ vers le globe, et une quantité de chaleur égale vers l'enceinte.

La somme des quantités de chaleur que perd l'enveloppe est égale à la somme des quantités de chaleur qu'elle reçoit; ce qui donne une première équation :

$$2e''s'' = bes + b'e's' \sin^2 \omega.$$

On a de même pour le globe et pour l'enceinte deux autres équations qui reproduisent la première :

$$es = e's' + (1 - b')\, e's' \sin^2 \omega,$$
$$e's' \sin^2 \omega = e''s'' + (1 - b) es.$$

En supposant que l'enveloppe diathermane ait peu d'épaisseur, et que son rayon excède peu celui du globe, comme il arrive pour l'atmosphère autour de la terre, on a $s = s' = s'' \sin^2 \omega$, et les deux équations précédentes deviennent

$$e = e'' + (1 - b')\, e',$$
$$e' = e'' + (1 - b) e.$$

Si l'on en tire les valeurs de $\frac{e}{e'}$, $\frac{e}{e''}$, $\frac{e'}{e''}$, et si on les égale aux valeurs de $\frac{e}{e'}$, $\frac{e}{e''}$, $\frac{e'}{e''}$, déduites des relations

$$e = g . a^t; \quad e' = g . a^{t'}; \quad e'' = g . f'' a^{t''},$$

qui existent en vertu du théorème précédent, lorsqu'on désigne par t, t'', t', les températures du globe, de l'enveloppe et de l'enceinte, et qu'on suppose le pouvoir émissif de l'enveloppe égal à f'', et les deux autres égaux à l'unité, on arrive enfin aux expressions :

$$a^{t-t'} = \frac{2 - b'}{2 - b},$$
$$a^{t-t''} = f'' . \frac{2 - b'}{b + b' - bb'},$$
$$a^{t'-t''} = f'' . \frac{2 - b'}{b + b' - bb'},$$

qui donnent, dans tous les cas possibles, les différences de températures voulues par les conditions d'équilibre, entre le globe

et l'enceinte, le globe et l'enveloppe, l'enceinte et l'enveloppe. On voit que ces différences dépendent essentiellement des valeurs relatives de b et de b', c'est-à-dire, des valeurs relatives des pouvoirs absorbants que l'enveloppe diathermane exerce sur la chaleur du globe et sur celle de l'enceinte.

Ce théorème général, qui pourrait d'ailleurs s'étendre à plusieurs enveloppes, complète les conditions d'équilibre qui s'établissent par voie de rayonnement.

§ 4. *Conductibilité des corps pour la chaleur.*

242. La *conductibilité* est la propriété dont jouissent les corps, d'absorber la chaleur et de la répandre dans leur masse. On distingue la *conductibilité extérieure* ou la *pénétrabilité*, et la *conductibilité propre* ou la *perméabilité*. Par sa pénétrabilité, un corps laisse le calorique passer de sa surface à la surface d'un corps contigu, ou *vice versa;* par sa perméabilité, il laisse le calorique passer d'un point à un autre de sa masse. Par exemple, une barre de fer étant plongée par une de ses extrémités dans un bain de plomb fondu, on sait que la chaleur gagne peu à peu sur la longueur de la barre, et qu'à la fin elle se fait sentir jusqu'à une grande distance. Or, la quantité de chaleur qui entre par une étendue donnée de la partie plongée dépend de la pénétrabilité; et celle qui passe d'une section à la section suivante dépend de la pénétrabilité et de la perméabilité, car elle dépend des pertes qui se font à l'extérieur par la surface libre, et de la facilité avec laquelle le calorique se propage d'une molécule du fer à la molécule suivante.

243. Conductibilité des solides.— Lorsqu'on veut simplement constater l'inégale conductibilité des différents corps, on peut se servir de l'appareil d'Inghenouz (Pl. 46, Fig. 11). Cet appareil se compose d'une petite caisse a, en cuivre, sur un des côtés de laquelle on fixe perpendiculairement de petits cylindres c, de diverses substances, et de même diamètre, dont chacun est recouvert d'une couche de cire. En versant dans la caisse de l'eau bouillante ou de l'huile très-chaude, la chaleur pénètre dans les cylindres et fait fondre la cire qui les recouvre : pour les uns, la cire fond jusqu'à une grande distance de la caisse, ce sont les meilleurs conducteurs; pour les autres, elle ne fond qu'à quelques millimètres de distance, ce sont les mauvais conducteurs.

Mais lorsqu'on veut apprécier les rapports numériques des

conductibilités des différents corps, il faut avoir recours à d'autres considérations et à d'autres expériences. D'abord on démontre, par le calcul (voy. les Traités de Fourier et de Poisson), que, si une barre cylindrique ou prismatique ayant une section a, un contour c, une *conductibilité extérieure* h, et une *conductibilité intérieure* k, se trouve plongée par une de ses extrémités dans une source de température constante, et qu'elle ait eu le temps de se mettre en équilibre, l'air qui l'enveloppe étant lui-même maintenu à une température constante plus basse que celle de la source, il y a alors, entre l'excès de température z de l'une de ses sections et la distance d de cette section à la source, une relation particulière exprimée par l'équation :

$$z = mr^{-d} + nr^{d},$$

m et n sont deux constantes; la valeur de r est donnée par $r = e^{b}$; e est la base des logarithmes népériens; et $b^2 = \frac{ch}{ak}$.

D'après la forme de cette équation, il est facile de démontrer, par de simples substitutions, que, si l'on considère dans la barre diverses sections dont les distances à la source, exprimées par d_1, d_2, d_3..... croissent en suivant une progression arithmétique dont la raison soit i, les excès de température correspondants z_1, z_2, z_3, jouiront de cette propriété : que, si l'on fait la somme de deux quelconques de rangs impairs consécutifs, et qu'on la divise par celui de rang pair qui les sépare, on aura toujours le même quotient; qu'il en serait de même de deux de rangs pairs, divisés par celui de rang impair qui les sépare; c'est-à-dire que l'on a toujours :

$$\frac{z_1 + z_3}{z_2} = \frac{z_2 + z_4}{z_3} = \frac{z_3 + z_5}{z_4},$$

et la valeur de ce quotient est $r^{-i} + r^{i}$ ou $e^{-bi} + e^{bi}$.

Cette propriété a été en effet vérifiée par M. Despretz sur quelques métaux bons conducteurs, comme le cuivre et le fer. M. Despretz procédait de la manière suivante : la barre métallique de 21 millimètres de côté était disposée horizontalement (Fig. 11); de décimètre en décimètre elle portait un trou rempli de mercure, de 6 millimètres de diamètre et de 14 millimètres de profondeur; c'est là qu'étaient plongés les thermomètres d'observation; l'extrémité de la barre était chauffée par la flamme

Digitized by Google

d'un quinquet; il fallait deux ou trois heures pour que l'équilibre pût s'établir; le nombre des thermomètres était de 6. Voici le résultat de l'expérience pour le cuivre :

Distance des thermomètres.	Excès de température.	Quotients de deux excès par un excès intermédiaire.	Quotient de deux excès consécutifs.
100mm	66°,4		1,4
200	46 ,3	2,14	1,4
300	32 ,6	2,15	1,4
400	24 ,5	2,11	1,4
500	18 ,6	2,17	1,4
600	16 ,2		1,4

ce qui confirme avec assez d'exactitude la propriété dont il s'agit; mais pour les corps moins bons conducteurs, comme le zinc, l'étain et le plomb, cette propriété cesse de se confirmer aussi exactement : pour le marbre, l'écart est tel que l'un de ces quotients est triple de l'autre; et pour les corps moins bons conducteurs que le marbre, comme la porcelaine et la terre cuite, l'écart est encore plus grand.

Les substances pour lesquelles *le quotient de la somme de deux excès par l'excès intermédiaire est constant* sont les seules dont on puisse déterminer la conductibilité par des expériences de cette nature. On y parvient alors de la manière suivante : on choisit des barres de même dimension, on les enduit d'une couche de vernis pour qu'elles perdent également et par le rayonnement et par le contact de l'air, et on espace les thermomètres d'observation de la même manière. Dans ces circonstances, a, c, h et i, sont les mêmes. Soient $2q$ le quotient pour l'une des substances ayant une conductibilité k, et $2q'$ pour une autre ayant une conductibilité k', on aura pour la première et pour la deuxième :

$$e^{-bi} + e^{bi} = 2q; \quad e^{-b'i} + e^{b'i} = 2q'.$$

On en tire aisément :

$$e^{bi} = q + \sqrt{q^2 - 1}; \quad e^{b'i} = q' + \sqrt{q'^2 - 1};$$

et par conséquent :

$$b^2 = \left[\log(q + \sqrt{q^2 - 1})\right]^2; \quad b'^2 = \left[\log(q' + \sqrt{q'^2 - 1})\right]^2;$$

d'où
$$\frac{k}{k'} = \left(\frac{\log(q' + \sqrt{q'^2 - 1})}{\log(q + \sqrt{q^2 - 1})}\right)^2.$$

Digitized by Google

On démontre pareillement, par le calcul, que, quand la barre a une grande longueur, la relation entre l'excès de température z d'une section et la distance d de cette section se réduit à

$$z = sr^{-d},$$

la constante de l'autre terme r^d ou e^{bd} devant être nulle, puisque sans cela ce terme aurait une valeur infinie pour d infini, ce qui ne peut pas être : l'excès de température, pour cette section placée à une distance infinie de la source, devant, au contraire, être égal à zéro ; dans ce cas, s est l'excès de la température de la source elle-même sur la température ambiante, puisque $d = 0$ donne $z = s$.

Il en résulte que, *les distances à la source croissant en progression arithmétique, les excès correspondants décroissent en progression géométrique*. Ces distances étant en effet d_1, d_2, d_3..., avec $d_2 - d_1 = i$, $d_3 - d_2 = i$, etc., et les excès correspondants étant z_1, z_2, z_3, etc., on aura évidemment :

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{z_2}{z_3} = \frac{z_3}{z_4} = r^i = e^{bi}.$$

C'est aussi ce qui se trouve vérifié par les expériences déjà citées de M. Despretz. Cette égalité des quotients des excès consécutifs entraîne elle-même celle de la somme de deux excès par l'excès intermédiaire, car les égalités précédentes donnent évidemment :

$$\frac{z_3 + z_1}{z_2} = \frac{z_4 + z_2}{z_3} = \text{etc.}$$

Si l'on représente par g l'un des quotients précédents, on aura $e^{bi} = g$. Pour une autre substance de mêmes dimensions en épaisseur, où les thermomètres seraient espacés de la même manière, on aurait $e^{b'i} = g'$. D'où il est facile de conclure comme précédemmnent :

$$k' = \left(\frac{\log g'}{\log g}\right)^2.$$

On peut remarquer que, pour arriver au rapport des conductibilités, il est tout à fait indifférent de prendre les quotients des excès consécutifs quand ils sont égaux, ou de prendre les quotients de la somme de deux excès divisés par l'excès intermé-

Digitized by Google

diaire; car l'un de ces quotients peut se déduire de l'autre, et les résultats sont identiques.

La relation $z = sr^{-d}$ ou se^{-bd}, conduit encore à trois conséquences que nous devons pareillement indiquer.

Pour une même substance, en supposant deux barres carrées d'épaisseurs différentes l, l', on aurait dans l'une $b^2 = \frac{4h}{lk}$, dans l'autre $b'^2 = \frac{4h}{l'k}$, d'où $\frac{b'^2}{b^2} = \frac{l'}{l}$; d'ailleurs en appelant z l'excès de la seconde pour la distance d', on aurait $z' = se^{-b'd'}$, et, si l'on veut que ces excès soient égaux, il est facile de voir qu'il en résulte :

$$\frac{l'}{l} = \frac{d'^2}{d^2};$$

c'est-à-dire, que les distances à la source pour lesquelles les excès sont égaux, sont précisément entre elles comme les racines carrées des épaisseurs. Dans ce cas l'on obtiendrait des quotients constants, g pour la première et g' pour la seconde, qui peuvent être aussi liés aux épaisseurs, car on aurait :

$$e^{bi} = g, \quad e^{b'i} = g';$$

d'où

$$\frac{l'}{l} = \left(\frac{\log g}{\log g'}\right)^2;$$

c'est-à-dire, que les racines carrées des épaisseurs sont en raison inverse des logarithmes des quotients.

Pour deux substances différentes et de mêmes dimensions, on aurait $\frac{b^2}{b'^2} = \frac{k'}{k}$, et pour des excès égaux $\frac{k'}{k} = \frac{d'^2}{d^2}$; c'est-à-dire, que les conductibilités sont entre elles comme les carrés des distances à la source pour lesquelles les excès sont égaux.

MM. Wiedemann et Franz ont fait de nouvelles recherches sur la conductibilité des corps solides (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XLI, ann. 1854), par un procédé analogue à celui de M. Despretz, dont nous venons de parler. Seulement ils observaient les températures au moyen de pinces thermo-électriques ajustées avec les précautions convenables. Le tableau suivant contient, en même temps, les résultats de M. Desprets et ceux de MM. Wiedemann et Franz.

Digitized by Google

	Despretz.	Wiedemann et Franz.		Despretz.	Wiedemann et Franz.
Or	1000	1000	Fer	374	224
Platine	981	158	Zinc	363	»
Argent	973	1880	Étain	303	273
Cuivre	898	1383	Plomb	180	160
Laiton	»	444	Palladium	»	118
Acier	»	218	Bismuth	»	34

On donne ordinairement aussi 23 pour la conductibilité du marbre, et 11 ou 12 pour la conductibilité de la porcelaine et de la terre cuite ; mais ces nombres sont très-incertains, puisque le procédé ne peut s'appliquer à ces substances.

Au reste, nous devons remarquer que la théorie de la conductibilité, dont nous venons de rapporter les formules, suppose essentiellement que les pertes de chaleur sont proportionnelles aux excès de température ; mais cette loi de Newton n'étant vraie que pour les petits excès, les conséquences des formules ne sont vraies elles-mêmes que dans ces limites ; il est donc nécessaire dans les expériences, de ne comparer entre elles que des sections dont les excès soient assez peu différents, soit en rapprochant suffisamment les thermomètres d'observation, soit en donnant aux substances qu'on éprouve des épaisseurs beaucoup plus considérables.

Ces conditions différentes dans les expériences n'empêchent pas la comparaison des conductibilités.

Soient, en effet, deux substances, pour lesquelles on ait obtenu les quotients g et g' des excès consécutifs : g ayant été obtenu avec une épaisseur de barre l et une distance i entre les thermomètres ; g' avec une épaisseur l' et une distance i'. Il est facile de voir qu'on aura :

$$\frac{k}{k'} = \frac{i'^2}{i^2} \cdot \frac{l}{l'} \cdot \left(\frac{\log g'}{\log g}\right)^2,$$

sous la seule condition que les conductibilités extérieures h et h' soient les mêmes.

244. Expériences de M. de Sénarmont sur la conductibilité de la chaleur dans les cristaux. — Dans ce qui précède, les recherches de conductibilité se rapportent à des masses de matière tellement considérables, que l'on n'entrevoit pas même la possibilité de soumettre à l'épreuve les cristaux pour apprécier leurs conductibilités relatives suivant des lignes plus ou moins

Digitized by Google

obliques par rapport à l'axe de cristallisation. Cependant M. de Sénarmont est parvenu à résoudre cette question par une méthode qui semble ne rien laisser à désirer tant elle est simple et ingénieuse : il opère seulement sur des lames cristallines ayant quelques centimètres de largeur et quelques millimètres d'épaisseur; tantôt elles sont obtenues par le clivage, tantôt elles sont taillées et polies artificiellement; mais toujours orientées avec soin par rapport aux axes optiques ou aux lignes principales de cristallisation. Ces lames sont percées d'un trou qui n'a quelquefois que $\frac{1}{4}$ de millimètre de diamètre, dans lequel s'engage la pointe conique d'un gros fil d'argent convenablement recourbée, qui devient lui-même la source de chaleur, parce qu'il est chauffé assez loin de la lame avec une lampe à alcool. Maintenant, pour observer la propagation de la chaleur autour de ce centre d'échauffement, il suffit de rendre la lame horizontale, après l'avoir enduite de cire, ou d'un autre corps aisément fusible. Si la conductibilité est la même dans tous les sens, la ligne isotherme de fusion forme un cercle; si la conductibilité est inégale, la ligne isotherme forme une courbe analogue à une ellipse plus ou moins allongée dont on peut mesurer avec assez de précision les divers rayons vecteurs.

M. de Sénarmont a ainsi soumis à l'épreuve les cristaux les mieux choisis dans les systèmes cristallographiques de diverses formes, savoir :

1° Dans le système régulier :

Le spath fluor, la pyrite cubique, le fer oxydulé, le cuivre oxydulé, la galène, la blende.

2° Dans le système prismatique droit à base carrée :

L'oxyde d'étain, le rutile, l'idocrase, le protochlorure de mercure.

3° Dans le système rhomboédrique :

Le spath calcaire, le quartz, le béryl, le fer oligiste, le corindon.

4° Dans le système prismatique, rhomboïdal ou rectangulaire droit :

La baryte sulfatée, la topaze, l'aragonite, la bournonite, le sulfure d'antimoine, la staurotide.

5° Dans le système prismatique rectangulaire, ou rhomboïdal oblique symétrique :

La glauberite, le feldspath adulaire, le feldspath pierreux, le pyroxène augite, le wolfram, le gypse.

Par ces diverses expériences, faites pour chaque cristal, en

choisissant des lames diversement inclinées, et d'épaisseurs comprises entre $\frac{1}{2}$ millimètre et 2 ou 3 millimètres, M. de Sénarmont a été conduit aux conclusions suivantes :

1° Dans le système régulier, la conductibilité est égale en tous sens, et les surfaces isothermes sont des sphères;

2° Dans le système prismatique droit à base carrée, la conductibilité prend une valeur maximum ou minimum dans la direction parallèle à l'axe de figure, elle est égale dans toutes les directions perpendiculaires à cet axe, et les surfaces isothermes sont des ellipsoïdes de révolution autour de la ligne de symétrie, ellipsoïdes tantôt allongés, tantôt aplatis;

3° Dans les cristaux qui appartiennent au système rhomboédrique ou au système du prisme droit rhomboïdal ou rectangulaire, la conductibilité prend trois valeurs, maximum, moyenne et minimum, suivant trois directions rectangulaires, toujours parallèles aux axes cristallographiques, et les surfaces isothermes sont des ellipsoïdes dont les trois axes inégaux coïncident avec les trois axes de symétrie.

4° Dans le système du prisme rectangulaire oblique, la conductibilité prend trois valeurs différentes et rectangulaires : la première parallèle à l'axe cristallographique, la seconde et la troisième, non assignables *a priori*, parce qu'elles ne se rattachent à aucun axe de symétrie. Les surfaces isothermes sont donc des ellipsoïdes à trois axes inégaux, dont un seul est d'avance déterminé de position.

Il suffit d'énoncer ces lois pour faire comprendre les analogies remarquables qui existent entre la propagation de la lumière et celle de la chaleur dans les corps cristallisés; la seconde dépend comme la première de la position des axes de moindre et de plus grande élasticité de l'éther.

245. Conductibilité des fluides. — La propagation de la chaleur dans les fluides se fait en général par les courants multipliés qui s'établissent nécessairement par les différences de densité, qui résultent elles-mêmes des différences de température. Ces courants sont rendus visibles dans l'eau, au moyen de petits corps flotant dans la masse, comme de la sciure de bois très-fine : lorsqu'on chauffe, par exemple, de l'eau très-lentement par le fond, dans une cloche renversée (Fig. 13), on voit les courants ascendants s'établir au centre, et les courants descendants suivre les parois. Il en est de même dans les gaz, comme

on peut le démontrer par une foule d'expériences. Cependant, si les masses fluides étaient chauffées de manière que l'équilibre hydrostatique ne pût pas être troublé, il est évident que la chaleur s'y transmettrait alors de proche en proche, comme dans les solides; car il est évident que ces corps ont aussi une conductibilité propre, puisque s'ils en étaient dépourvus, ils ne pourraient ni se réchauffer, ni se refroidir, ni prendre des densités différentes par l'effet de la chaleur. M. Despretz a essayé de démontrer cette conductibilité par l'expérience, en prenant des colonnes d'eau d'un mètre de hauteur, et en les chauffant par le sommet au moyen d'un renouvellement d'eau chaude. Il a opéré ainsi sur deux colonnes différentes, ayant des diamètres de 218^{mm} et 405^{mm}. Les thermomètres d'observation étant espacés de 45^{mm}, il fallait environ trente heures pour que l'équilibre fût établi. Les quotients des excès consécutifs ont été constants, le premier égal à 1,6, et le deuxième à 1,4; leurs logarithmes sont bien en raison inverse des racines carrées des diamètres, comme on devait s'y attendre. En introduisant ces conditions dans la formule précédente pour comparer la conductibilité du cuivre à celle de l'eau, on trouve que la première est 95 fois plus grande que la seconde; ainsi, dans la table précédente, la conductibilité de l'eau serait exprimée par 9 ou 10.

L'air et les gaz sont de très-mauvais conducteurs; mais leurs conductibilités ne pourraient pas être étudiées par les procédés que nous avons décrits, parce que les thermomètres d'observation restant soumis au rayonnement, leurs indications n'accuseraient pas les températures des différentes couches. Le seul genre d'expérience qui prouve la mauvaise conductibilité des gaz, et particulièrement de l'air, est la lenteur des réchauffements et des refroidissements des corps qui sont protégés par des couches d'air, quand la mobilité de l'air lui-même est empêchée par des corps très-divisés, comme la paille, la laine, la soie, l'édredon et toutes les substances filamenteuses. Ainsi, la mauvaise conductibilité de nos vêtements, des fourrures et de tous les corps de cette espèce, tient à deux causes : elle tient à ce que tous les corps déliés et divisés, même les poudres métalliques, sont de mauvais conducteurs par eux-mêmes; et à ce que l'air qui remplit les intervalles, et dont une foule de petits obstacles empêchent la mobilité, est lui-même un mauvais conducteur de la chaleur. C'est pourquoi il faut bien se garder de comprimer ces

corps et de les presser pour exclure l'air : de la ouate ou de l'édredon, pressés comme du carton deviendraient d'assez bons conducteurs ; comme ils deviendraient aussi de meilleurs conducteurs, si leurs filaments n'étaient pas assez rapprochés pour gêner les mouvements de l'air. Il est à peine nécessaire d'ajouter que ces corps, que l'on appelle *chauds*, ne sont nullement chauds par eux-mêmes ; ils empêchent seulement le passage de la chaleur, et ils ne sont pas moins propres à empêcher la fusion de la glace pendant l'été qu'à empêcher pendant l'hiver le refroidissement des corps qu'ils enveloppent.

§ 5. *Analogie des rayons calorifiques et des rayons lumineux.*

Depuis l'époque où Leslie et Rumford ont découvert les moyens d'apprécier la chaleur rayonnante et d'en comparer les effets, les physiciens se sont appliqués à démêler les rapports qui existent entre les rayons calorifiques et les rayons lumineux. On a reconnu d'abord, d'une manière générale, que la chaleur se réfléchit et se réfracte ; M. Bérard a démontré ensuite qu'elle se polarise ; mais la découverte de l'électro-magnétisme a donné des moyens plus délicats de poursuivre ces analogies. Après les travaux de M. Melloni, dont nous avons donné une idée (**217**), sont venus ceux de M. Forbes, de M. Knoblauch, et surtout ceux de MM. de La Provostaye et Desains. Ces deux derniers physiciens, avec autant d'habileté que de persévérance, ont pris en quelque sorte un à un tous les phénomènes caractéristiques de la lumière pour découvrir, par des mesures précises, jusqu'à quel point ils peuvent avoir leurs analogues dans la chaleur. Les résultats auxquels ils sont parvenus fourniront donc les données principales de cet article ; seulement, j'ai le regret de ne pouvoir développer autant que je l'aurais voulu leurs méthodes d'observation toujours si ingénieuses et si sûres.

246. Réfraction de la chaleur. — Les lentilles ordinaires démontrent la réfraction de la chaleur solaire, de celle qui émane de la flamme et des corps incandescents ; elles peuvent aussi rendre sensible la réfraction de la chaleur obscure ; mais il faut alors employer des plaques, ou en général des sources de chaleur d'une grande étendue. M. Melloni a rendu ces expériences plus faciles et plus décisives pour toute espèce de chaleur. On dispose l'expérience de la manière suivante : on place sur le support de l'appareil un prisme de sel gemme, et, à quelque distance, une

Digitized by Google

lampe Locatelli; on cherche la direction du faisceau lumineux émergent, lorsque la déviation est minimum. Cela fait, on place des écrans et l'on dispose l'axe de la pile sur la direction des rayons réfractés par le prisme; alors l'aiguille du thermo-multiplicateur est déviée dès qu'on baisse les écrans; et elle est encore déviée dans le même sens lorsqu'à la lampe on substitue la spire de platine, la plaque de cuivre à 400°, ou même le petit cube rempli d'eau bouillante; puis elle cesse de l'être si l'on tourne un peu la pile pour la faire sortir du faisceau réfracté. Donc les chaleurs de ces diverses sources sont réfractées par le sel gemme, et leur indice de réfraction n'est pas très-différent de l'indice de réfraction de la lumière.

Une autre conséquence de la réfrangibilité de la chaleur, pareillement confirmée par l'observation, est la réflexion totale qu'elle éprouve sur la seconde surface d'un prisme de sel gemme lorsque l'incidence atteint une limite convenable.

247. Polarisation de la chaleur par double réfraction et rapports d'intensité. — MM. de La Provostaye et Desains (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXVII, p. 109) ont démontré :

1° Qu'en traversant un prisme de spath, un faisceau de chaleur se divise en deux parties égales et complétement polarisées, l'une dans la section principale, l'autre dans un plan perpendiculaire;

2° Que, dans un second prisme, ces faisceaux se partagent conformément à la loi de Malus (**191**);

3° Que, sur le verre, ils se réfléchissent avec des intensités conformes à la loi de Fresnel (**192**);

4° Que, sur les métaux, ils se réfléchissent aussi comme la lumière.

Les expériences se disposent de la manière suivante : un trait horizontal de lumière solaire, réfléchi par l'héliostat, tombe sur un prisme de spath achromatisé, et d'un angle assez grand pour que les deux faisceaux se séparent à 60 centimètres. L'un est arrêté par un écran; l'autre, après avoir subi les épreuves convenables, arrive à la pile de l'appareil de Melloni, qui en donne l'intensité.

Veut-on prouver que sa chaleur est complétement polarisée, on le réfléchit sur une glace verticale, sous l'angle de 56°, et l'on constate, si c'est le faisceau ordinaire, qu'il donne une grande déviation au galvanomètre quand la section principale du prisme est horizontale, et qu'il ne produit aucun effet quand elle est verticale : l'action est inverse pour le faisceau extraordinaire.

Digitized by Google

Veut-on prouver la loi de Malus, on présente, à celui des faisceaux qui passe, un second prisme qu'il doit traverser avant d'arriver à la pile, et l'on observe son intensité calorifique pour diverses positions de la section principale du second prisme par rapport à celle du premier; ces intensités se trouvent presque exactement proportionnelles au carré du cosinus de l'angle des deux sections.

Pour démontrer la loi de Fresnel, on opère d'une manière analogue : au sortir du premier prisme, le faisceau qui passe est reçu par une glace verticale, sous des angles variables, et réfléchi sur la pile. On fait pour chaque faisceau deux séries d'expériences, l'une avec la section principale horizontale, l'autre avec la section verticale, afin de rendre successivement le plan de polarisation parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion. Les intensités ainsi observées sont très-concordantes avec celles qui résultent de la formule de Fresnel, lorsqu'on fait les calculs en adoptant 1,52 comme indice de réfraction de la chaleur solaire.

Pour les comparaisons d'intensités des deux faisceaux, il est nécessaire de mettre en avant du prisme une lame peu épaisse de spath, parallèle à l'axe, et tournée dans l'azimut convenable pour dépolariser la portion du faisceau qui se polarise par réflexion sur le miroir de l'héliostat.

C'est encore le même mode d'observation qui a été suivi pour déterminer les proportions de chaleur polarisée qui se réfléchissent sur les métaux polis, soit quand le plan de polarisation est parallèle au plan d'incidence, soit quand il lui est perpendiculaire. Les expériences ont été faites sur l'acier, le métal des miroirs, le platine et l'argent. Voici le tableau des résultats :

	Direction du plan de polarisation par rapport au plan d'incidence.			Direction du plan de polarisation par rapport au plan d'incidence.	
Incidences.	parallèle. Intensités.	perpendiculaire. Intensités.	Incidences.	parallèle. Intensités.	perpendiculaire. Intensités.
	ACIER.			MÉTAL DES MIROIRS.	
30	0,64	0,57	30	0,67	0,62
50	0,69	0,47	50	0,74	0,58
70	0,83	»	72,5	0,90	0,42
76	0,87	0,27	80	0,94	0,44
80	0,90	0,29		ARGENT.	
	PLATINE.		30	0,80	0,86
30	0,47	0,37	50	0,87	»
70	0,75	0,31	70	0,94	0,81
80	0,86	0,38	80	0,95	0,82

Digitized by Google

MM. de La Provostaye et Desains font, à ce sujet, deux remarques importantes :

1° Ces déterminations s'accordent avec celles que M. Jamin a faites des proportions de lumière polarisée qui, sous diverses incidences, se réfléchissent sur l'acier et sur le métal des miroirs (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XIX, p. 296). La réflexion de la chaleur se trouve donc, comme celle de la lumière, représentée d'une manière générale et avec une exactitude surprenante par les formules théoriques de M. Cauchy;

2° La demi-somme des intensités des faisceaux qui se réfléchissent quand ils sont polarisés, l'un dans le plan d'incidence, l'autre dans le plan perpendiculaire, doit reproduire l'intensité du faisceau qui se réfléchit à l'état naturel et sans être polarisé; c'est ce qui a été en effet vérifié pour l'incidence de 30°; et l'accord a été tel, qu'il n'a pas été nécessaire d'étendre la vérification aux autres obliquités.

Des expériences analogues ont été faites avec une lampe modérateur (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXX, p. 276); mais alors il a été nécessaire de concentrer la chaleur avec une assez large lentille de 17 centimètres de longueur focale, qui se plaçait à 34 centimètres de la flamme; le prisme de spath se disposait immédiatement derrière la lentille. Les deux images étaient dégagées l'une de l'autre à 27 centimètres, et là on arrêtait tour à tour par un écran celui des deux faisceaux sur lequel on ne voulait pas opérer. Le tableau suivant contient le résultat des expériences.

Digitized by Google

Réflexion de la chaleur polarisée d'une lampe à double courant.

ANGLES D'INCIDENCE.	POUVOIRS RÉFLECTEURS.								
	PLAN DE POLARISATION PARALLÈLE AU PLAN D'INCIDENCE.								
	Métal des miroirs.		Acier.	Platine.		Étain.	Zinc.	Argent	Laiton
30°	0,70	0,73	0,69	0,68	0,70	0,69	0,69	»	0,88
50	0,77	0,78	0,77	0,77	0,77	»	»	»	0,88
60	»	0,82	»	»	»	0,79	»	»	»
70	0,85	0,86	0,87	0,84	»	0,84	»	»	0,89
76	0,89	0,90	0,90	0,87	»	0,89	0,84	0,98	0,90
	PLAN DE POLARISATION PERPENDICULAIRE AU PLAN D'INCIDENCE.								
30	0,67	0,70	0,62	0,66	0,69	0,63	0,68	»	0,81
50	0,62	0,65	0,55	0,62	0,65	0,62	0,66	»	0,79
60	»	0,60	»	»	»	0,60	»	»	»
70	0,50	0,52	0,42	»	0,53	0,55	0,60	»	0,73
76	0,43	0,46	0,55	0,44	0,46	0,50	0,56	0,86	0,72

On voit que le faisceau polarisé dans le plan d'incidence prend des intensités croissantes avec l'obliquité, tandis que le faisceau polarisé perpendiculairement prend au contraire des intensités décroissantes qui tendent vers un minimum plus ou moins éloigné de 76°; phénomène analogue à celui que présente la chaleur solaire, dans le tableau précédent. On peut de même ici, en formant la demi-somme des deux faisceaux polarisés à angle droit, composer la proportion de chaleur naturelle réfléchie sous les obliquités correspondantes, ce qui explique la loi si singulière des intensités réfléchies sous diverses incidences.

248. Variation du pouvoir réflecteur avec la nature du flux incident. — MM. de La Provostaye et Desains ont déduit cette proposition importante, soit des tableaux qui précèdent, soit d'expériences antérieures (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXII, p. 386) faites avec une lampe Locatelli, soit enfin d'expériences directes, variées de diverses manières avec l'alcool salé, ou même avec une lame de cuivre chauffée à 400° (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXX, p. 276).

Voici le tableau des résultats :

Digitized by Google

Proportions de diverses chaleurs non polarisées réfléchies par les métaux sous des obliquités peu différentes.

SOURCES DE CHALEUR.	Acier.	Métal des miroirs.	Platine.	Argent.	Laiton.
Chaleur solaire, limite du vert......	»	0,58	0,59	»	0,63
Chaleur solaire, rouge............	»	0,65	0,60	»	0,75
Chaleur solaire totale............	0,59	0,65	»	0,87	»
Chaleur solaire, en dehors du rouge.	0,75	»	»	»	0,90
Chaleur de la lampe modérateur....	0,65	0,71	0,68	0,92	0,83
Chaleur de la lampe Locatelli......	0,83	0,85	»	0,95	0,93
Chaleur de l'alcool salé...........	0,88	»	0,86	»	0,94
Chaleur du cuivre à 400°..........	»	»	0,89	»	0,94
Chaleur de la lampe Locatelli qui a traversé un verre de 5 millimètres.	»	0,74	»	0,94	»

249. Polarisation par réflexion, par réfraction simple, rapports d'intensité. — MM. de La Provostaye et Desains, en partant des formules de Fresnel, ont établi des formules qui expriment, soit pour la lumière, soit pour la chaleur, les intensités des faisceaux réfléchis et transmis, qui résultent de faisceaux incidents polarisés parallèlement ou perpendiculairement au plan d'incidence, quand la réflexion et la transmission s'appliquent à une pile de glaces composée d'un nombre quelconque de lames; ils ont vérifié l'exactitude de ces formules, pour une seule lame, et pour des piles de deux, de trois et de quatre lames; cette vérification s'est faite par une méthode semblable à celle qui a donné les résultats précédents; seulement il fallait composer les piles avec des glaces de Saint-Gobain, minces et très-bien polies, et n'employer la lumière qu'après lui avoir fait traverser préalablement une grande épaisseur de verre pour éviter les absorptions locales. Alors, au moyen de quelques artifices de calcul, ils ont pu discuter cette théorie générale des piles de glaces, et en déduire non-seulement les quantités totales de chaleur naturelle, qui doivent se réfléchir ou se transmettre dans une pile donnée, mais encore les proportions absolues ou relatives de chaleur polarisée qui doivent se trouver dans les faisceaux réfléchis et transmis.

250. Polarisation par émission. — M. Arago a découvert, depuis longtemps, que les corps solides et liquides incandescents ont la propriété d'émettre de la lumière qui est plus ou moins

Digitized by Google

polarisée, dans un plan perpendiculaire au plan d'émission. MM. de La Provostaye et Desains sont parvenus à rendre sensible le même phénomène pour la chaleur, du moins pour la chaleur émise par les corps solides, sous certaines conditions. De plus, en suivant les méthodes polarimétriques de M. Arago, ils ont pu déterminer les proportions de chaleur polarisée, et les proportions de lumière polarisée qui sont émises simultanément par le platine incandescent (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXVIII, p. 252, et t. XXXII, p. 112).

Dans la plupart des expériences la lame de platine était verticale, et mobile au centre d'un cercle gradué qui donnait son inclinaison par rapport à l'axe horizontal de la pile thermo-électrique : un éolypile, alimenté par l'alcool absolu, lançait une flamme à peu près constante contre la face postérieure de la lame de platine et la portait ainsi à un point d'incandescence qui pouvait se soutenir uniforme pendant la durée des expériences; sur le trajet du faisceau de chaleur que cette lame envoyait à la pile thermo-électrique se disposait une pile de mica, sous un angle connu, mais dont le plan d'incidence pouvait être rendu tantôt parallèle, tantôt perpendiculaire au plan d'émission. En variant ainsi les azimuts de la pile de mica on devait trouver au faisceau calorifique transmis, ou une intensité constante, ou un maximum et un mininum d'intensité; dans le premier cas le faisceau émis par la surface incandescente n'était point polarisé, dans le second cas il était plus ou moins polarisé, et son plan de polarisation était perpendiculaire au plan d'incidence correspondant au maximum d'intensité.

Mais pour obtenir les rapports d'intensité, il fallait avant tout établir la graduation de la pile de mica, et l'on y procédait de la manière suivante : le faisceau de chaleur d'une lampe à courant d'air était polarisé par un prisme bi-réfringent, comme nous l'avons indiqué plus haut, celui des faisceaux qui n'était pas arrêté par l'écran, traversait perpendiculairement une lame de quartz parallèle à l'axe et se trouvait ainsi plus ou moins dépolarisé, suivant l'angle a de la section principale du quartz avec le plan primitif de polarisation.

En effet, $\cos^2 a$ et $\sin^2 a$ représentent les intensités polarisées parallèlement et perpendiculairement à la section principale du quartz, leur différence $\cos^2 a - \sin^2 a$ exprime donc la proportion qui reste polarisée, puisque les deux autres portions égales et

Digitized by Google

polarisées à angle droit reconstituent de la chaleur naturelle, ou non polarisée. Connaissant ainsi, au moyen de l'angle a, ce qui est polarisé et ce qui ne l'est pas dans le faisceau transmis par le quartz, on lui présente la pile de mica sous une inclinaison connue et dans les deux positions du maximum et du minimum de transmission. Alors le quotient des deux déviations correspondantes du galvanomètre donne le rapport des deux intensités maximum et minimum. Le tableau suivant contient les résultats de l'expérience.

Valeurs de a.	Valeurs de $\cos^2 a - \sin^2 a$.	Rapport des déviations.
22°	0,919	0,324
27	0,588	0,400
33	0,407	0,555
37	0,276	0,690
40	0,175	0,770

Lorsqu'on opère ensuite avec la même pile de mica et la surface incandescente, on cherche avec soin les deux positions du maximum et du minimum de déviation ; si le rapport de ces déviations est, par exemple, 0,400 ou 0,690, on en conclut que la proportion de chaleur polarisée par émission est 0,588 ou 0,276 ; ensuite, par interpolation l'on trouve les nombres intermédiaires.

Pour la lame de platine poli et incandescente, l'expérience a donné les nombres suivants :

Angle des rayons émis avec la normale à la surface d'émission.	Proportion de chaleur polarisée perpendiculairement au plan d'émission.	Proportion de lumière polarisée perpendiculairement au plan d'émission.
70°	0,70	0,45
60	0,51	0,32
40	0,26	»
30	0,06 ou 0,07	»
0	0,00	»

Le platine platiné, sous l'angle de 70°, ne donnait que 0,13 de chaleur polarisée; le noir de fumée, sous la même incidence, n'a pas donné trace de lumière polarisée.

Quand la lame de platine poli était chauffée seulement à 300 ou 400°, on observait encore des traces sensibles de chaleur polarisée; et, dans ces circonstances, on en observait même avec la lame de platine platiné.

Digitized by Google

Dans le cours de ces expériences, MM. de La Provostaye et Desains ont eu occasion de vérifier que le pouvoir réflecteur du platine poli est sensiblement le même quand il est à l'état d'incandescence et à la température ordinaire.

251. La chaleur éprouve comme la lumière les deux polarisations rotatoires, atomique et magnétique. — M. Biot avait depuis longtemps constaté avec M. Melloni (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. II) que le quartz perpendiculaire à l'axe exerce sur la chaleur polarisée une action rotatoire semblable à celle qu'il exerce sur la lumière ; en même temps, il avait émis le vœu que des liquides actifs sur la lumière fussent aussi soumis à cette épreuve. MM. de La Provostaye et Desains ont répondu à cet appel, et ils ont démontré 1° que le flint soumis à l'électro-aimant dévie le plan de polarisation de la chaleur, comme il dévie celui de la lumière (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXVII, p. 232); 2° que la térébenthine, les dissolutions de sucre, et, en général, les liquides actifs sur la lumière, sont pareillement actifs sur la chaleur (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXX, p. 267). Les méthodes d'observations dont ils ont fait usage dans ces recherches délicates sont analogues à celles que nous avons fait connaître plus haut.

252. Influence de la diffusion sur la polarisation des rayons calorifiques incidents. — MM. de La Provostaye et Desains ont publié plusieurs Mémoires sur ce sujet (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXVI, p. 212 ; *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXIV, p. 192, ann. 1852); ils sont parvenus à mesurer la proportion totale de chaleur diffusée par différents corps sous l'incidence normale ; mais cette proportion varie à la fois avec la nature des corps et avec l'état de la surface ; ce qui ne permet pas d'arriver à une conclusion générale. Ils ont essayé ensuite d'étudier l'influence de la diffusion sur la polarisation des rayons incidents ; mais pour discuter les résultats qu'ils ont obtenus, il faudrait entrer ici dans plus de détails que l'importance du sujet ne semble l'exiger quant à présent.

253. Conclusions. — Il résulte de ce qui précède, que les propriétés des rayons calorifiques ont, en effet, les analogies les plus directes, les plus intimes avec les propriétés des rayons lumineux ; tout est pareil, excepté les interférences, qui, par des raisons purement accidentelles, n'ont pas pu être produites et mesurées dans la chaleur comme dans la lumière ; mais on ne

Digitized by Google

peut guère douter que les franges de diffraction des rayons calorifiques ne puissent être observées aussitôt que l'on aura pu faire des thermomètres de dimensions comparables aux dimensions des franges elles-mêmes. On est ainsi conduit à cette question : la lumière est-elle une espèce de chaleur et la chaleur une espèce de lumière ? Y a-t-il entre ces deux agents une différence essentielle ou une différence accidentelle, relative seulement à nos perceptions?

Un exemple fera mieux comprendre cette pensée. Nous n'entendons pas toutes les vibrations de la matière pondérable, celles qui sont trop faibles, celles qui sont trop lentes ou trop rapides nous échappent et laissent nos sens en repos, comme si nos perceptions devaient être limitées. Nous appelons vibrations sonores celles que nous entendons; mais celles qui nous échappent, soit parce qu'elles manquent d'amplitude, soit parce qu'elles donnent des ondes trop longues ou trop courtes, n'ont aucune différence essentielle avec celles que nous entendons; c'est, au dehors de nous, le même phénomène physique, s'accomplissant avec des périodes analogues, se propageant avec la même vitesse; tout est pareil, si ce n'est que l'un de ces mouvements tombe dans les limites de nos perceptions, et l'autre au dehors. Pour des organisations diverses, ces limites peuvent être différentes; n'est-il pas très-possible que tel ou tel insecte n'entende aucunement le bruit du canon et distingue au loin le bruit de l'aile du cousin ?

De même, nous ne voyons pas toutes les vibrations de l'éther, il y en a qui échappent à nos sens et qui les laissent en repos. Ce mouvement vibratoire tombe dans les limites de nos perceptions quand il donne des ondes plus courtes que le rouge et plus longues que le violet; celles-là seules sont pour nous des ondes lumineuses dont les couleurs diverses se distinguent par des longueurs différentes. Toutes les ondes, plus longues que le rouge et plus courtes que le violet, tombent hors des limites de nos perceptions; mais elles n'en existent pas moins dans le sein de l'éther; phénomène physique semblable au premier; qui s'accomplit et se propage suivant les périodes et les lois qui lui sont propres. Entre les ondes qui sont lumineuses et celles qui ne le sont pas, il n'y a donc aucune différence essentielle; ce sont deux mouvements analogues qui se distinguent seulement par le fait accidentel que l'un tombe dans les limites de nos perceptions

Digitized by Google

et l'autre au dehors. Et, comme pour les ondes sonores, rien ne s'oppose à ce que ces limites ne changent avec l'organisation ; rien ne s'oppose à ce que, pour des êtres différents du règne organique, elles ne soient plus ou moins restreintes, plus ou moins étendues, plus ou moins déplacées dans l'échelle générale comprise entre les plus grandes et les plus petites vitesses de vibration dont l'éther est susceptible. Ces principes posés, je reviens à la question : la lumière n'est-elle qu'une espèce de chaleur et la chaleur une espèce de lumière ? ou, en d'autres termes, la lumière n'est-elle que de la chaleur visible, se distinguant de la chaleur en général, par la seule propriété accidentelle d'être perceptible par l'organe de la vue ? Je crois que la science est assez avancée pour que l'on puisse raisonnablement poser cette question ; mais je crois aussi que la science n'a pas encore acquis tous les éléments nécessaires pour la résoudre avec certitude.

CHAPITRE II.

Calorimétrie.

§ 1. *Capacité des corps pour la chaleur.*

254. Des quantités de chaleur et des moyens de les comparer. — Nous admettons comme un principe évident de lui-même que, pour produire un même effet, il faut toujours une même quantité de chaleur. Par exemple, un kilogramme de fer étant à la température de 10°, s'il passe d'une manière quelconque à la température de 11°, nous admettons qu'il reçoit toujours la même quantité de chaleur, soit que cette chaleur lui vienne du soleil ou d'un foyer, soit qu'elle lui vienne du contact ou du rayonnement d'un corps quelconque. De même, un kilogramme de glace à 0° prend toujours la même quantité de chaleur pour se fondre, et un kilogramme d'eau à 100° prend toujours la même quantité de chaleur pour se vaporiser. Les quantités de chaleur sont d'ailleurs proportionnelles aux poids des substances sur lesquelles elles produisent le même effet, c'est-à-dire, qu'il faudra cent fois plus de chaleur pour chauffer 100 kilogrammes de fer de 10 à 11°, ou pour fondre 100 kilogrammes de glace, ou pour vaporiser 100 kilogrammes d'eau. Ainsi, pour comparer entre elles des quantités de chaleur données, il suffit de les appliquer successivement à chauffer un corps au même point, ou à fondre de la glace, ou à vaporiser de l'eau, et de comparer ensuite les poids de ces corps sur lesquels elles ont produit leurs effets.

Une substance a plus ou moins de *capacité pour la chaleur*, suivant qu'elle exige plus ou moins de chaleur pour éprouver un changement de température donné, un changement de 1°, par exemple ; et cette quantité de chaleur s'appelle elle-même la *chaleur spécifique* de la substance. Deux corps auront donc des capacités égales si, à poids égal, ils exigent la même quantité de chaleur pour s'échauffer de 1° : au contraire, l'un aura une capacité double ou triple de l'autre s'il exige deux ou trois fois

Digitized by

plus de chaleur. Le rapport des chaleurs spécifiques est évidemment le même que celui des capacités.

Un même corps peut avoir une *capacité variable*, c'est ce qui arrive, par exemple, au platine, qui absorbe des quantités de chaleur différentes pour passer de 0 à 1°, et pour passer de 100° à 101°; ou de 1000° à 1001°; sa capacité est *croissante*, puisqu'elle augmente toujours avec la température : l'eau a, au contraire, une capacité sensiblement *constante*, que l'on a coutume de choisir pour unité.

Il résulte évidemment de ces définitions que, si un corps, ayant un poids m et une capacité c, se réchauffe ou se refroidit de t^{o}, il gagne ou il perd une quantité de chaleur exprimée par mct; il en résulte pareillement que, si un système de corps ayant des masses m_1, m_2, etc., et des capacités c_1, c_2, etc., éprouve dans toutes ses parties une variation de température t, la résultante des quantités de chaleur perdues ou gagnées est $m_1c_1t + m_2c_2t + m_3c_3t +$ etc.; et, si l'on conçoit alors un corps dont le poids $m = m_1 + m_2 +$ etc., et dont la capacité $c = \frac{m_1c_1 + m_2c_2 + \text{etc.}}{m}$ cette capacité c est appelée la *capacité moyenne* du système pour la chaleur.

On détermine, en général, les chaleurs spécifiques par trois méthodes que nous allons indiquer, savoir : la méthode du calorimètre, la méthode des mélanges, et la méthode du refroidissement.

255. Calorimètre de Lavoisier et de Laplace. — Une coupe de cet instrument est représentée (Pl. 46, Fig. 20); il se compose de trois vases minces c, d et e, dont le plus grand c enveloppe le moyen d, et celui-ci, à son tour, enveloppe le plus petit. L'intervalle qui sépare le premier du second se remplit de glace dont l'eau de fusion s'écoule par le robinet r, et l'intervalle qui sépare de toutes parts le second du troisième est pareillement rempli de glace pilée dont l'eau de fusion s'écoule par le robinet s. Ainsi, le calorique extérieur est arrêté et absorbé par la première couche de glace, et ne peut jamais pénétrer jusqu'à la seconde couche pour y opérer une fusion; de même le calorique intérieur, celui qui sort de la substance enfermée dans le petit vase, est entièrement absorbé par la seconde couche de glace, et employé à la fondre, sans pouvoir jamais passer dans la première couche, et, à plus forte raison, sans pouvoir jamais

Digitized by Google

se perdre à l'extérieur. D'après cela, rien n'est plus facile à comprendre que l'usage de cet instrument pour résoudre les questions relatives à la capacité.

Soient m, m' les poids des deux corps, c, c' leurs capacités pour la chaleur, t, t' leurs températures au moment où ils entrent dans le calorimètre, g, g' les quantités de glace qu'ils fondent, ou les quantités d'eau que l'on recueille dans chaque expérience lorsque les corps sont parvenus à la température 0. Les quantités de chaleur qu'ils ont perdues sont évidemment proportionnelles aux quantités de glace g et g' qu'ils ont fondues : mais le premier perd mct, le deuxième perd $m'c't'$. On a donc :

$$\frac{mct}{m'c't'} = \frac{g}{g'}; \quad \text{d'où} \quad \frac{c}{c'} = \frac{g}{g'} \cdot \frac{m't'}{mt}.$$

En opérant sur le même corps porté à des températures différentes, on reconnaîtrait par là si la capacité est constante ou variable.

Pour soumettre les liquides à ces expériences, il faut les renfermer dans un flacon, et alors on fait deux expériences, l'une avec le flacon vide, l'autre avec le flacon contenant le liquide. Dans la première expérience, la quantité de chaleur perdue est mct; dans la seconde, elle est $mct' + m'c't'$. En supposant qu'on parte d'une autre température t', et que m' et c' désignent la masse et la capacité du liquide, en représentant toujours par g et g' les quantités de glace fondues dans la première et la deuxième expérience, on aurait alors :

$$\frac{mct}{mct' + m't'c'} = \frac{g}{g'};$$

d'où il est facile de tirer $\frac{c}{c'}$, ou le rapport des capacités du flacon et du liquide.

C'est ainsi que par cette méthode toutes les capacités peuvent être rapportées à l'eau; car une fois que l'on a, par exemple, la capacité d'un flacon de verre par rapport à l'eau, on rapporte les capacités des autres substances à celle du verre; et pour rapporter ces capacités à celle de l'eau il suffit de les multiplier par la capacité du verre par rapport à l'eau.

Ces expériences, qui paraissent si simples, ne sont pas cependant sans difficultés : si l'on emploie de la neige ou de la glace

pilée trop fin, l'eau de fusion s'imbibe dans les fragments de glace; et, si d'avance on les sature d'eau, on recueille à la fois l'eau de fusion et celle de saturation qui ne peut être évaluée qu'imparfaitement. On obtient plus d'exactitude en choisissant des fragments de glace de dimensions convenables.

On peut dans certains cas substituer au calorimètre un puits de glace (Fig. 14) creusé dans de la glace très-compacte.

Quant à la température des corps, au moment où ils entrent dans le calorimètre, elle se détermine en les plongeant dans un bain liquide, dont la température est connue, et en les tirant du bain, lorsqu'ils en ont pris la température, pour les porter rapidement dans l'appareil. Si la couche liquide que le corps emporte avait un poids un peu considérable, on en tiendrait compte en ajoutant à la quantité de chaleur perdue par le corps celle que perd le liquide lui-même; celle-ci est aussi égale à son poids, multiplié par sa température et par sa capacité qui devrait être connue.

256. Méthode des mélanges. — Dans cette méthode, la chaleur perdue par un corps qui se refroidit est reçue par un second corps qui se réchauffe, et, si l'on connaît les poids de ces corps, il suffit d'observer les températures perdues et gagnées pour en déduire le rapport de leurs capacités. Le corps qui se refroidit est, par exemple, une masse de métal m, ayant une capacité c et une température t avant le mélange; le corps qui se réchauffe est une masse d'eau m', dont la température est t' avant le mélange et dont la capacité est prise pour unité; le vase qui contient l'eau a un poids a et une capacité b; le thermomètre qui marque la température du mélange a aussi une portion e de son poids qui participe au réchauffement; soit d sa capacité; désignons enfin par θ la température du mélange.

Le corps en tombant de la température t à la température θ perd un nombre de degrés $t-\theta$ et une quantité de chaleur $mc\,(t-\theta)$.

L'eau s'élevant de t' à θ, gagne une température $\theta-t'$, et une quantité de chaleur $m'\,(\theta-t')$. Par la même raison, le vase et le thermomètre, qui participent au réchauffement de l'eau, gagnent $ab\,(\theta-t')$ et $ed\,(\theta-t')$. Ainsi la quantité totale de chaleur gagnée est

$$(m'+ab+ed)\,(\theta-t') \quad \text{ou} \quad m_1\,(\theta-t').$$

en faisant $m_1=m'+ab+cd$; m_1 est alors la *masse d'eau corrigée*.

En égalant cette quantité de chaleur reçue à la quantité de chaleur perdue, on a :

$$mc(t-\theta)=m_1(\theta-t') \quad \text{ou} \quad c=\frac{m_1(\theta-t')}{m(t-\theta)}.$$

Voici la disposition que j'ai adoptée pour employer cette méthode à la détermination des capacités du platine jusqu'à la température de 1200°.

a (Pl. 46, Fig. 16) est un vase de cuivre mince, qui repose sur un socle de bois, où il est reçu par trois bouchons de liége saillants; *b* est une enveloppe pareille au vase, qui empêche les courants d'air et les variations accidentelles de température; le couvercle *c* du vase est percé d'un trou assez grand, et porte un panier en fil de cuivre où se jette le corps; un agitateur *d* sert à mélanger l'eau pour refroidir le corps plus promptement et réduire la durée de l'expérience à 30 ou 40 secondes; le thermomètre *e* est placé de côté; la feuille de l'agitateur porte une échancrure pour ne pas le toucher; les mouvements du thermomètre s'observent avec le cathétomètre : on peut ainsi estimer les cinquantièmes de degré. Il est nécessaire d'avoir plusieurs appareils de dimensions différentes, afin que l'élévation de température ne dépasse jamais 4° ou 5°.

Cela posé, on met dans le vase de l'eau qui soit à 5 ou 6° au-dessous de la température ambiante, et, pendant 8 ou 10', on en observe le réchauffement de 2' en 2'; on note l'instant où l'on jette la boule de platine, ou en général les corps; et la loi du réchauffement qu'on a observée donne la température précise de l'eau au moment de l'immersion. En agitant l'eau vivement, 30" suffisent pour que le thermomètre devienne stationnaire, et, comme il se trouve alors très-près de la température ambiante, il n'y a en général aucune correction à faire pour les quantités de chaleur gagnées ou perdues par le vase à l'extérieur pendant ces 30" : s'il devait y en avoir une, on observerait, pour la faire, la loi du réchauffement ou du refroidissement qui succède à l'état stationnaire du thermomètre.

Dans mes expériences, la boule de platine, du poids de 178 grammes, était contenue dans un creuset de platine très-épais; sa température était donnée par le pyromètre à air, avec

Digitized by Google

lequel elle était en contact dans la moufle de fer; on ouvrait le creuset, sur le bord du vase des capacités, pour jeter à l'instant même la boule dans le liquide. Quand la boule était à la température de la fusion de l'or, son refroidissement ne durait pas plus de 35 à 40″; mais, dans ce cas, il fallait une masse d'eau beaucoup plus considérable.

M. Regnault a suivi un procédé analogue, dans le travail très-remarquable qu'il a fait sur les capacités des corps simples et composés. Voici la disposition de son appareil : le corps est chauffé dans une étuve à une température à peu près constante, ensuite il est jeté rapidement dans le vase destiné au mélange, et les températures s'observent au cathétomètre. L'étuve se compose d'un vase à triple enveloppe *a*, *b*, *c* (Pl. 47, Fig. 7); entre *a* et *b* il y a de l'air et de la ouate, entre *b* et *c* un courant de vapeur, et dans l'intérieur du cylindre *c* se trouve le corps soumis à l'expérience. Le courant de vapeur est produit par une petite chaudière *x* qui est toujours en ébullition; il arrive par le tube incliné *y*, et s'échappe par le tube *y'* pour aller au serpentin *x'*. Le corps est contenu dans une petite corbeille *d* de fils métalliques, au centre de laquelle est un cylindre où se loge le réservoir du thermomètre *e*. Ce thermomètre s'échauffe lentement; mais à la fin il se maintient immobile, et alors on est assuré qu'il accuse exactement la température du corps. Le vase des mélanges est en *f*; on observe son thermomètre *g*, et le thermomètre *h* qui donne la température ambiante. Quand le moment est venu, on ouvre le registre à coulisse *i*, on pousse le vase *f* sur un petit chemin de fer qui l'amène au-dessous du cylindre *c*, on ouvre le registre horizontal *k*, on laisse couler le fil qui retient la corbeille, et celle-ci vient tomber doucement dans l'eau. Alors le vase est ramené au point de départ; cette manœuvre dure 30″, et dans le court instant que le vase passe dans l'étuve, il est abrité par des écrans d'eau que l'on voit sur la figure; dès qu'il est de retour, le mélange se fait rapidement au moyen d'un agitateur, et l'on observe à la fois la température maximum et la durée de l'expérience. Soit m_1 le poids corrigé de l'eau, c'est-à-dire son poids réel, augmenté du poids du vase et de la portion du thermomètre qui plonge, l'un et l'autre étant estimés en eau comme nous venons de le voir; soient m le poids du corps, et μ le poids de la corbeille aussi estimée en eau; t leur température commune, t' la

Digitized by Google

température de l'eau avant le mélange, et θ sa température maximum après le mélange. S'il n'y avait pas de correction à faire, on aurait

$$m_1(\theta - t') = (mc + \mu)(t - \theta),$$

d'où il serait facile de tirer la valeur de c.

M. Regnault fait les corrections de la manière suivante :

Il observe d'avance la vitesse v de réchauffement ou de refroidissement du vase; il trouve, par exemple, que pendant 1" et pour un excès de température de 1°, l'on a $v = a$. Cela posé : soient y l'excès de la température ambiante sur celle du vase, au moment de l'expérience, et y' l'excès de la température du vase sur celle de l'air au moment où l'on observe le maximum; dans la première période, dont la durée est z, le vase se réchauffe, et il se refroidit dans la deuxième, dont la durée est z'. Le réchauffement a lieu avec l'excès y qui peut être regardé comme constant; il est donc ayz; le refroidissement a lieu avec un excès variable, qui devient y' à la fin de l'expérience; mais il est plus simple de le prendre pour constant, sauf à ne lui appliquer qu'une fraction p du temps z'; il devient ainsi $apz'y'$. La différence est $a(pz'y' - zy)$, qui doit être ajoutée à la température θ du maximum, mais seulement dans le terme qui est relatif au vase, et non pas dans celui qui est relatif au corps. En désignant par θ' cette valeur corrigée de θ, on a

$$\theta' = \theta + a(pz'y' - zy),$$

et la formule devient

$$m_1(\theta' - t') = (mc + \mu)(t - \theta);$$

d'où l'on tire

$$c = \frac{m_1(\theta' - t')}{m(t - \theta)} - \frac{\mu}{m}.$$

Voici les principales conditions numériques dans lesquelles M. Regnault a fait la plus grande partie de ses expériences.

L'eau du vase pèse toujours environ 462gr,5.

Le poids du vase de laiton		55gr,5, ou en eau	5,18
Le mercure du thermomètre		7 ,62	0,25
Le verre	*id.*	1 ,27	0,27
			5,70

ainsi $m_1 = 462,5 + 5,70$.

Digitized by Google

Le poids du corps est variable, de 100^{gr} à 500^{gr} à peu près.

Les diverses corbeilles de laiton, estimées en eau, pèsent de $0^{gr},26$, à $1^{gr},26$; c'est dans ces limites que varie μ d'une expérience à l'autre.

La température t' de l'eau avant le mélange est maintenue à 1° ou 2° au-dessous de la température ambiante, c'est la valeur de y ; et le maximum θ s'élève en général à 2° ou 3° au-dessus, c'est la valeur de y'.

La température t de l'étuve varie de 98 à 99°.

Le temps z est de $30''$.

Le temps z' ne doit pas dépasser $3'$ ou $4'$ pour que l'on puisse compter sur l'exactitude du résultat ; quant à la fraction p, des essais ont fait voir qu'elle pouvait être prise égale à 0,75 ; la valeur de a est de 0,0001386. Il est facile de voir d'après cela que la correction de θ s'élève ordinairement à 4 ou 5 centièmes de degré ; cependant elle ne doit pas être négligée.

Les tableaux VII, VIII et IX, qui terminent cet article, contiennent les résultats auxquels est parvenu M. Regnault. (Pag. 620 et suivantes).

257. Méthode du refroidissement. — Dulong et Petit ont donné à cette méthode une exactitude qu'elle n'avait pas auparavant. Leur appareil (Pl. 46, Fig. 17) se compose d'une enceinte de plomb a, où l'on fait le vide ; son couvercle b porte une douille destinée à recevoir le bouchon de métal c ; dans ce bouchon est mastiqué le thermomètre d'observation d dont la tige et les divisions sont saillantes, et son réservoir cylindrique plonge dans le petit vase d'argent e, qui est suspendu au bouchon par des fils et qui contient le corps soumis à l'expérience. Si ce corps est solide, on le réduit en poudre, et l'on tasse cette poudre dans le vase d'argent, tout autour du réservoir du thermomètre ; le vase doit en être rempli pour que les expériences soient bien comparables. Après avoir chauffé à 15 ou 20° au-dessus de la température ambiante le vase d'argent et le corps qu'il contient, on les porte dans l'enceinte de plomb, on la plonge elle-même dans un bain de température constante, on fait le vide, et l'on observe la vitesse du refroidissement, ou plutôt on observe le temps que le thermomètre met à descendre de l'excès de 10° à l'excès de 5° au-dessus du bain. On observe ainsi dans les mêmes circonstances, pour tous les corps, les durées du refroidissement de 10° à 5°. Ici, les corps

Digitized by Google

étant mauvais conducteurs, les températures indiquées par le thermomètre ne sont pas communes à toute la masse; mais, à cause même de l'imperfection à peu près égale de la conductibilité, on suppose que la distribution de la chaleur est à peu près la même, et l'on admet par conséquent, que, dans des expériences faites sur deux corps différents, les quantités de chaleur perdues pour l'abaissement de 5° ont entre elles le même rapport que si l'abaissement était commun à toute la masse. Il est évident d'un autre côté que pour des excès de température égaux, il s'écoule par le vase d'argent des quantités de chaleur égales dans le même temps. Donc, les quantités de chaleur perdues pour le même abaissement de 10 à 5° sont entre elles comme les durées z et z' du refroidissement; mais, si m, m', c et c', sont les poids et les capacités des deux appareils, leurs quantités de chaleur perdues pour les 5° sont $5mc$ et $5m'c'$; donc, enfin,

$$\frac{mc}{m'c'} = \frac{z}{z'}.$$

On doit remarquer, cependant, que m est ici le poids m_1 de la substance elle-même dont la capacité est c_1, plus le poids a du vase d'argent dont la capacité est b, plus encore le poids d de la portion plongée du thermomètre dont la capacité est e; c est la capacité moyenne de ce système; en sorte que l'on a :

$$mc = m_1c_1 + ab + de; \quad \text{et} \quad m = m_1 + a + d.$$

On a de même :

$$m'c' = m_2c_2 + ab + de; \quad \text{et} \quad m' = m_2 + a + d;$$

ce qui donne enfin :

$$\frac{m_1c_1 + ab + de}{m_2c_2 + ab + de} = \frac{z}{z'};$$

d'où il est facile de tirer le rapport $\frac{c_1}{c_2}$, losqu'on connaît m_1; m_2; a; b; d et e.

Il faudrait des précautions particulières pour comparer, par ce procédé, un corps solide à un corps liquide, puisque dans ce second cas la température est uniforme, tandis qu'elle ne l'est pas dans le premier; en général, l'exactitude des comparaisons repose sur la similitude de la distribution de la chaleur dans les corps qui sont soumis à l'expérience.

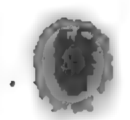
Digitized by Google

M. Regnault a essayé d'employer ce procédé pour quelques substances qui se prêtent difficilement à la méthode des mélanges; mais il n'en a pas toujours obtenu des résultats satisfaisants. L'inégal tassement des corps en poudre exerce une telle influence, que l'argent faiblement tassé lui a donné une capacité de 0,085; tandis que le même corps, plus fortement tassé, lui a donné 0,057. Cependant, les expériences faites sur les liquides n'offrent pas, à beaucoup près, de telles divergences; elles montrent qu'avec des précautions convenables, la méthode du refroidissement peut très-bien s'appliquer à ces corps.

258. Capacité des gaz pour la chaleur. — MM. Delaroche et Bérard ont fait sur ce sujet un très-beau travail, qui fut couronné par l'Académie des sciences, en 1812.

Voici une indication du procédé employé par ces habiles physiciens (Pl. 46, Fig. 15).

Deux grands vases de Mariotte, *a* et *d*, convenablement disposés, donnaient un écoulement d'eau uniforme, qui déterminait un écoulement d'air pareillement uniforme : l'air venait presser une vessie *b* pleine du gaz soumis à l'expérience; et le forçait à s'échapper avec une vitesse constante pour aller parcourir le serpentin *s* entouré d'eau, qui composait le *calorimètre;* au sortir du serpentin, le gaz rentrait dans une vessie vide *c*, d'où il était chassé par l'écoulement de l'eau du second vase de Mariotte *d*, pour retourner dans la première vessie *b*, après avoir traversé de nouveau le serpentin dans les mêmes conditions de température. Ces retours successifs pouvaient se répéter autant de fois qu'il était nécessaire. Avant d'entrer dans le serpentin, le gaz parcourait un tube enveloppé d'un autre tube *e* plein de vapeur d'eau bouillante; immédiatement à l'entrée du serpentin, un thermomètre *f* marquait sa température, et un autre thermomètre marquait sa température de sortie. On connaissait d'ailleurs, par des expériences préalables, le nombre des degrés que le calorimètre pouvait recevoir par la communication directe du tube qui apportait le gaz chaud, et l'on faisait la correction dépendant de cet excès, qui n'appartenait pas au gaz lui-même. Enfin, le calorimètre était dans une pièce séparée par une cloison du reste de l'appareil, afin qu'une cause accidentelle ne pût agir sur son réchauffement ou sur son refroidissement; un thermomètre très-sensible donnait à chaque instant la température de l'eau dont il était rempli, et par conséquent celle de



l'enveloppe, celle du serpentin, et celle de toute la masse composant le calorimètre.

Cela posé, les expériences étaient conduites de la manière suivante : on connaissait, approximativement, l'excès de température que le calorimètre devait prendre sur la température ambiante, et on le portait à cette température, puis l'on faisait passer le courant de gaz, et on le maintenait assez longtemps pour être assuré que l'équilibre était bien établi, et que la température était parfaitement constante. Soient, dans une première expérience : r, la température ambiante corrigée, c'est-à-dire augmentée de l'élévation de température que le tube chaud donne au calorimètre; s, la température du calorimètre à l'équilibre; t, la température du gaz à son entrée dans le calorimètre : m', la masse de gaz qui passe en une minute; et c, sa capacité pour la chaleur. Puisque le gaz perd un nombre de degrés $t-s$, dans 1', il perd une quantité de chaleur $m'c\,(t-s)$. Soit m la masse corrigée du calorimètre, c'est-à-dire le poids de l'eau, plus le poids du cuivre et du thermomètre évalués en eau; sa capacité pour la chaleur étant prise pour unité, et son excès de température sur la température ambiante étant $s-r$, la quantité de chaleur qu'il perd en 1' est $mg\,(s-r)$, g étant une constante qui peut se déterminer aisément en observant la vitesse de refroidissement du calorimètre abandonné à lui-même. Or, la quantité de chaleur perdue étant nécessairement égale à la quantité de chaleur reçue, on a $m'c\,(t-s)=mg\,(s-r)$, d'où l'on peut tirer la capacité c du gaz par rapport à l'eau.

Voici les données de l'expérience :

Le calorimètre contient 556^{gr} d'eau; le vase et le serpentin sont estimés en eau à $40^{gr},8$; la correction du thermomètre est négligée : ainsi $m=596^{gr},8$.

La température ambiante est $7^\circ,26$, sa correction est $2^\circ,19$; $r=7^\circ,26+2^\circ,19=9^\circ,45$.

La température s du serpentin à l'équilibre est $25^\circ,18$; $s-r=15^\circ,73$.

Le volume d'air qui passe en 10' est $35^{lit},99$ à 0 sous 760 : $m'=4^{gr},68$; sa température d'entrée $t=97^\circ,6$; $t-s=72^\circ,42$.

Pour trouver la vitesse de refroidissement du serpentin, on l'a chauffé avec une lampe pour le laisser refroidir dans les condi-

Digitized by Google

tions mêmes de l'expérience, sauf la circulation du gaz; on a obtenu les résultats suivants :

Temps écoulés.	Excès observés.
0'	23,61
5	22,56
10	21,58
15	20,66
20	19,75
25	18,88
30	18,06
35	17,29
40	16,54
45	15,85
50	15,18
55	14,56

au moyen des formules

$$t = cb^{-x} \quad \text{et} \quad v = (\mathrm{M} \log b)\, t$$

237. On tire, par la première et la dernière observation, $\log b = 0{,}0038169$, et, par conséquent, la vitesse de refroidissement pour un excès de 1°, ou $\mathrm{M} \log b = 0{,}0087888$; c'est ce que nous avons représenté par g. Cette vitesse de refroidissement est assez différente de celle qui avait été adoptée par MM. Delaroche et Bérard, d'après les mêmes observations, mais calculée par une autre méthode; aussi la capacité de l'air par rapport à l'eau que donne notre formule, est-elle seulement 0,243; tandis que ces physiciens trouvent 0,281. Il me paraît probable qu'il y a une incertitude d'environ $\frac{1}{10}$ sur la détermination de cet élément si important.

MM. Delaroche et Bérard, au lieu de prendre aussi les capacités des autres gaz par rapport à l'eau, comme ils auraient pu le faire, se sont bornés à déterminer toutes les autres capacités par rapport à celle de l'air; pour cela, ils ont admis ce principe : qu'en portant le calorimètre à l'équilibre, successivement avec les différents gaz, les capacités de ces gaz sont entre elles comme les excès de température du calorimètre sur l'air ambiant, pourvu que les gaz entrent tous à la même température, et qu'il en passe dans le même temps des volumes égaux et soumis à la même pression. Ce principe n'est pas rigoureusement exact; de plus, ce mode d'expérience exige de nombreuses corrections, soit de température, soit de volume, soit d'élasticité, qui sont pour la plupart incertaines, et qui ne permettent pas de regarder les résultats autrement que comme des premières

Digitized by Google

approximations, très-remarquables cependant pour l'époque où elles ont été obtenues.

Ces capacités relatives forment la deuxième colonne du tableau V, ci-après; elles se rapportent à des volumes égaux des différents gaz; pour en faire des capacités à masses égales, celle de l'air étant toujours prise pour unité, il suffit de diviser chacune d'elles par la densité correspondante du gaz. En effet, des volumes égaux d'air et d'hydrogène, par exemple, correspondent à des poids inégaux, qui sont entre eux comme les densités 1 et d de l'air et de l'hydrogène; or, le poids d'air ayant une capacité 1, et le poids d d'hydrogène une capacité c, il est évident que le poids 1 d'hydrogène aura une capacité $\frac{c}{d}$. C'est ainsi qu'a été formée la troisième colonne du tableau.

Enfin, en multipliant tous ces nombres par 0,2669, nombre définitivement adopté par MM. Delaroche et Bérard pour la capacité de l'air, par rapport à l'eau, on forme la dernière colonne, qui contient les densités des différents gaz rapportées à celle de l'eau prise pour unité.

259. MM. Delarive et Marcet ont repris ce problème de la chaleur spécifique des gaz, et ils en ont cherché la solution par un procédé qui doit inspirer d'autant plus de confiance, que Dulong l'avait aussi imaginé, à peu près à la même époque, et que c'est par sa méthode que les résultats en ont été calculés (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. LXXV, p. 113).

Un vase de cuivre mince, de 37^{mm} de hauteur sur 33^{mm} de diamètre, est muni d'un serpentin, et reçoit dans son axe un petit thermomètre; vide, il pèse $28^{gr},637$, et plein d'eau, il en contient $27^{gr},093$. On en observe le refroidissement au centre d'un globe vide, de 22 centimètres de diamètre, à surface intérieure noircie, et maintenu à une température constante. Cette observation se fait d'abord sans rien faire passer dans le serpentin, et ensuite en faisant passer successivement l'air et les gaz dont on veut déterminer les capacités relatives. Pour cela, deux tubes de verre sont ajustés, l'un à l'entrée, l'autre à la sortie du serpentin, et ils se recourbent parallèlement à la tige du thermomètre, pour venir, comme elle, sortir au dehors du globe. C'est une disposition analogue à celle de la figure 17.

Toutes les précautions sont prises pour que le vide soit fait au même degré, et se maintienne exactement pendant la série des

Digitized by Google

expériences comparatives; et aussi, pour que l'écoulement du gaz soit rigoureusement uniforme depuis le commencement jusqu'à la fin de chaque expérience. Sous ces conditions, et lorsqu'on se borne à des excès de température qui ne dépassent pas 15°, le refroidissement se fait d'après la loi de Newton. On a donc

$$t = cb^{-z}; \quad v = (M \log b)t,$$

et la constante b se détermine, comme nous l'avons vu (**257**), par l'équation

$$\log b = \frac{\log c - \log t}{z},$$

où c est l'excès initial, et où l'on met, par exemple, pour t l'excès final, et le temps z correspondant. On aura ainsi diverses valeurs de b, que nous désignerons par b, b', b'' : b, lorsque le refroidissement se fait par le rayonnement seul sans circulation; b', lorsque l'air circule dans le serpentin : b'', lorsqu'un autre gaz circule, par exemple l'hydrogène. Nous désignerons de même par v, v', v'', les vitesses de refroidissement correspondantes. Cela posé, soient u' la vitesse de refroidissement produite par le contact de l'air seul, et u'' celle qui serait de même produite par l'hydrogène seul. On aura

$$u' = v' - v, \quad \text{et} \quad u'' = v'' - v.$$

Car, pour le même excès de température, la chaleur enlevée à l'appareil dans la seconde expérience, se compose de celle qui est perdue par le rayonnement, et de celle qui est prise par l'air; la vitesse v' se compose donc des vitesses correspondantes à ces deux pertes; si donc on en retranche la première v, on doit avoir la seconde u'. Il en est de même pour l'hydrogène. Maintenant les capacités c'' et c' de l'hydrogène et de l'air seraient évidemment proportionnelles aux vitesses de refroidissement produites par ces gaz, pour un même excès de température, s'ils passaient en même volume dans le même temps; mais, d'une autre part, les vitesses de refroidissement produites par chacun sont proportionnelles aux volumes qui passent. Par conséquent les capacités sont en raison directe des vitesses de refroidissement propres à chaque gaz, et en raison inverse des volumes de ces gaz qui s'écoulent dans le même temps; en désignant ces volumes par λ' pour l'air, et par λ'' pour l'hydrogène, on a donc

$$\frac{c''}{c'} = \frac{u''}{u'} \cdot \frac{\lambda'}{\lambda''}.$$

Digitized by Google

MM. Delarive et Marcet ont fait toutes les observations d'une même série, en partant de la même température initiale, et en s'arrêtant à la même température finale. Dans ce cas, soient : d, d', d'', la durée de la première expérience, qui se fait sans circulation de gaz ; de la deuxième, avec circulation d'air ; et de la troisième, avec circulation d'hydrogène, on a

$$\log b = \frac{\log c - \log t'}{d}; \quad \log b' = \frac{\log c - \log t'}{d'};$$
$$\log b'' = \frac{\text{loc } c - \log t'}{d''};$$

c étant, comme à l'ordinaire, la température initiale, et t' la température finale. Ainsi

$$v = (m \log b)t; \; v' = (m \log b')t; \; v'' = (m \log b'')t,$$

et

$$\frac{u''}{u'} = \frac{v'' - v}{v' - v} = \frac{\log b'' - \log b}{\log b' - \log b} = \left(\frac{d - d''}{d - d'}\right)\frac{d'}{d''}.$$

D'ailleurs a et g étant les volumes d'air et d'hydrogène qui s'écoulent pendant les durées d' et d'' des expériences qui leur sont relatives, le volume d'hydrogène qui se serait écoulé pendant le temps d', est $\frac{g.d'}{d''}$; d'où il résulte :

$$\frac{\lambda'}{\lambda''} = \frac{a}{g} \cdot \frac{d''}{d'}.$$

Ce qui donne enfin

$$\frac{c''}{c'} = \left(\frac{d - d''}{d - d'}\right) \cdot \frac{a}{g}.$$

Par conséquent, dans ce mode de procéder, tout se réduit à observer les durées d, d', d'' des trois expériences, et les volumes a et g d'air et de gaz qui s'écoulent dans les deux dernières. Nous rapportons ici les détails d'une expérience.

Gaz oléfiant ou hydrogène bicarboné.

Température ambiante 11°.

$c = 25°$;
$t' = 19°$;
$d = 1240''$;
$d'' = 860''$; $a = 13675,88$;

1re $d'' = 624$; $g = 11487{,}31$; $\frac{c''}{c'} = 1{,}496$

2e $d'' = 594$; $g = 11603{,}24$; $\frac{c''}{c'} = 1{,}557$

3e $d'' = 632$; $g = 11038{,}32$; $\frac{c''}{c'} = 1{,}537$

Moyenne 1,530

On peut s'étonner qu'une méthode aussi correcte donne encore des différences de $\frac{1}{30}$, surtout quand elle est appliquée par d'aussi habiles observateurs. Je suis porté à croire que cela tient aux inégalités de température qui s'établissent autour du serpentin et dans l'eau du petit calorimètre; la moindre secousse, la moindre vibration du dehors suffit sans doute pour mêler les couches inégalement froides, et pour faire sauter le thermomètre de plusieurs centièmes de degré. La durée de l'expérience et les volumes de gaz se trouvent ainsi altérés dans une proportion notable. On arriverait sans doute à une plus grande précision, en opérant sur des masses trois ou quatre fois plus grandes, et surtout en se donnant un moyen d'agiter sans cesse le liquide du calorimètre.

MM. Delarive et Marcet ont cependant confirmé par leurs expériences les résultats que Dulong avait déjà établis par la méthode que nous indiquons ci-après, savoir : que les gaz simples ont la même capacité pour la chaleur, mais qu'il en est autrement des gaz composés. (Voy. tableau VI, p. 620.) Dulong avait trouvé pour l'acide carbonique et le gaz oléfiant, 1,17 et 1,53; MM. Delarive et Marcet trouvent 1,22 et 1,53.

On pourrait aussi avoir immédiatement la capacité des gaz par rapport à l'eau. Soit en effet p le poids de l'eau du calorimètre, et celui du vase et du thermomètre réduits en eau; puisque, dans l'unité de temps, qui est par exemple la seconde, l'air lui enlève un nombre de degrés u', sa perte de chaleur est pu', sa capacité étant 1. Soit ϖ le poids de l'air qui passe dans une seconde, il s'échauffe d'un nombre de degrés t, marqué par l'excès de température qui correspond à la vitesse u', et sa capacité par rapport à l'eau à poids égal étant k'; il gagne $k't\varpi$, ce qui donne

$$k't\varpi = pu'.$$

Digitized by Google

Mais

$$u' = v' - v = mt(\log b' - \log b) = mt(\log c - \log t')\left(\frac{d-d'}{dd'}\right);$$

d'ailleurs, p' étant le poids de l'air écoulé pendant les d' secondes que dure l'expérience, on a $\varpi = \frac{p'}{d'}$, et par conséquent

$$k' = \frac{p}{p'} m(\log c - \log t')\left(\frac{d-d'}{d}\right).$$

On aurait de même pour un autre gaz, dont la capacité serait k'' par rapport à l'eau,

$$k'' = \frac{p}{p''} \cdot m(\log c - \log t')\left(\frac{d-d''}{d}\right),$$

où p'' est le poids total du gaz qui passe pendant la durée d'' de l'expérience.

Ce qui donne en effet pour les capacités relatives et à poids égal du gaz et de l'air,

$$\frac{k''}{k'} = \frac{p'}{p''} \cdot \left(\frac{d-d''}{d-d'}\right).$$

MM. Delarive et Marcet n'ont pas donné dans leur travail tous les éléments de ces déterminations.

Rapport des capacités des gaz à pression constante et à volume constant.

260. La capacité dont nous venons de parler est la capacité à *pression constante*, puisque nous avons supposé que les gaz se dilataient librement par la chaleur sous la même pression, les assimilant par là aux corps solides et liquides que nous avons implicitement considérés aussi comme se dilatant ou se contractant sans obstacle, ou plutôt sans changement dans leurs pressions moléculaires intérieures ou extérieures.

Mais il est très-important d'examiner aussi les capacités à *volume constant*, c'est-à-dire les quantités de chaleur que prennent les corps pour changer de pression lorsqu'on les empêche de se dilater ou de changer de volume.

L'idée de chercher ces capacités pour les comparer aux premières appartient à Laplace, et l'on peut voir dans la *Méca-*

Digitized by

nique céleste combien elle a été féconde dans ses développements.

Nous devons nous borner à indiquer ici comment le rapport de ces deux capacités peut être déterminé par l'expérience.

Considérons une masse d'air m à la température t; supposons qu'on lui donne un accroissement de température t_1, qui détermine une augmentation de volume δ sous la même pression : sa capacité à pression constante étant c, la quantité de chaleur qu'elle reçoit est cmt_1. Une fois dilatée, comprimons-la de δ pour la ramener à son volume primitif : soit t_2 le nouvel accroissement de température qu'elle reçoit par l'effet de cette compression ; pour revenir à sa température primitive t, elle aura à perdre les deux excès de température $t_1 + t_2$; et, si l'on représente par c' sa capacité à volume constant, elle aura à perdre une quantité de chaleur

$$c'm(t_1 + t_2).$$

Or, en admettant que ces expériences soient faites sans qu'il y ait de chaleur employée à changer la température du vase qui contient l'air, il est évident que la chaleur perdue doit être précisément égale à la chaleur reçue

$$cmt_1,$$

ce qui donne :

$$cmt_1 = c'm(t_1 + t_2);$$

d'où

$$\frac{c}{c'} = 1 + \frac{t_2}{t_1} = k.$$

Ainsi, la capacité à pression constante est toujours plus grande que la capacité à volume constant, et leur rapport est égal à l'unité, plus le rapport des excès de température t_2 et t_1 ; t_1 est l'excès de température qui donne une certaine augmentation de volume δ sous la même pression ; t_2 est l'excès de température qui résulte d'une compression δ, égale à l'augmentation de volume donnée par t_1. (Poisson, *Ann. de Chim.*, t. XXIII, p. 13.)

Prenant par exemple $t_1 = 1^\circ$ et par conséquent δ égal au coefficient de dilatation a (en supposant que l'on parte de la température zéro), il en résultera $k - 1 = t_2$. Ainsi, pour tous les gaz qui auront en même temps le même coefficient de dilatation et la même valeur de k, il sera vrai de dire que, pour des com-

Digitized by Google

pressions égales, ils éprouvent la même élévation de température. Ce résultat remarquable peut être interprété de deux manières ; si ces gaz ont des capacités égales, *les quantités absolues de chaleur dégagées par ces compressions seront aussi égales ;* au contraire, s'ils ont des capacités différentes, les quantités absolues de chaleur dont il s'agit seront évidemment proportionnelles à ces capacités, puisqu'elles produisent la même élévation de température de 1°. Dulong regardait la première interprétation comme étant de beaucoup la plus naturelle ; mais la seconde ne me paraît pas moins simple. La compression se faisant sentir contre toutes les molécules pondérables de la masse, qu'y a-t-il de plus simple en effet que d'admettre que les quantités de chaleur dégagées par des compressions égales dans des volumes égaux de ces différents gaz, sont proportionnelles à leurs capacités? Admettons cependant l'opinion de Dulong ; comme il a démontré par des expériences dont nous allons parler, que la valeur de k est la même et égale à 1,421 pour l'air, l'oxygène et l'hydrogène, il en conclut que ces gaz simples ont aussi la même capacité pour la chaleur.

Au contraire, les gaz composés, comme l'acide carbonique, l'oxyde d'azote et le gaz oléfiant, ont des valeurs k, k_1, k_3, différentes de celle de l'air. Dulong a trouvé :

$$k_1 = 1,338; \quad k_2 = 1,343; \quad k_3 = 1,240.$$

Les coefficients de dilatation de ces gaz étant à peu près les mêmes que ceux de l'air, il en résulte que des compressions sensiblement égales produisent des élévations de température différentes, savoir :

$$0°,338, \quad 0°,343, \quad 0°,240.$$

En généralisant la loi précédente de Dulong, en admettant que les quantités absolues de chaleur dégagées par les compressions égales sont encore égales, il faudra que les élévations inégales de température soient en raison inverse des capacités à volume constant. Puisqu'on a pour l'air et pour l'acide carbonique

$$\frac{c}{c'} = k = 1,421 \; ; \quad \frac{c_1}{c'_2} = k_1 = 1,338,$$

il en résulte d'abord

$$\frac{c'_1}{c'} = \frac{k-1}{k_1-1} = \frac{0,421}{0,338} = 1,245.$$

Ensuite on pourra déduire les rapports des capacités de l'acide carbonique et de l'air à pression constante, ou $\frac{c_1}{c}$, car l'on a

$$\frac{c_1}{c}=\frac{c'_1k_1}{c'k}=\frac{k_1}{k}\cdot\frac{k-1}{k_1-1}=1,17.$$

C'est ainsi qu'a été formé le tableau suivant, qui contient les résultats de Dulong.

Noms des gaz.	Rapport des capacités.	Capacités à volumes constants.	Capacités à pressions constantes.
Air atmosphérique...........	1,421	1	1
Oxygène....................	1,421	1	1
Hydrogène..................	1,421	1	1
Acide carbonique............	1,338	1,245	1,17
Oxyde de carbone............	1,428	1	1
Oxyde d'azote...............	1,343	1,227	1,16
Gaz oléfiant................	1,240	1,754	1,53

Nous allons maintenant faire connaître le procédé de Dulong, en recommandant aux jeunes physiciens de méditer le Mémoire si important qu'il a publié sur ce sujet (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XLI).

k étant le rapport des capacités pour l'air, et k' pour un autre gaz, les carrés des vitesses v et v' du son dans l'air et dans le gaz, pour les températures t et t', sont liés (48) par la formule :

$$\frac{v'^2}{v^2}=\frac{(1+at')}{(1+at)}\cdot\frac{k'}{k}\cdot\frac{1}{d},$$

d étant la densité du gaz par rapport à l'air.

D'une autre part, les nombres n et n' des vibrations accomplies dans le même tuyau rempli d'air et de gaz, et soumis au même mode de vibrations, sont liés (49) aux vitesses par la formule :

$$\frac{n'^2l'^2}{n^2l^2}=\frac{v'^2}{v^2};$$

d'où

$$\frac{n'^2l'^2}{n^2l^2}=\frac{(1+at')}{(1+at)}\cdot\frac{k'}{k}\cdot\frac{1}{d}.$$

Ainsi, pour obtenir k', il suffit de connaître l, l', t, t', d, k.

Digitized by Google

et d'observer le nombre des vibrations n' et n. C'est ce que Dulong a fait avec l'admirable exactitude qui caractérise toutes ses recherches. Le tuyau vibrant était établi horizontalement dans une caisse où l'on pouvait faire le vide, pour la remplir ensuite du gaz que l'on voulait soumettre à l'expérience; par l'un de ses bouts, le tuyau recevait le vent d'un gazomètre rempli du même gaz, et, à l'autre bout, il recevait un piston dont la tige extérieure passait dans une boîte à étoupes; la position du piston étant ainsi connue, on en déduisait sa distance à l'embouchure, et le double de cette distance était la longueur de l'onde ou de la concamération finale; le gaz sortait par une ouverture convenable, et la température était marquée par de bons thermomètres. Quant au nombre des vibrations, il était observé directement sur une sirène que l'on maintenait à l'unisson avec le tuyau vibrant, pendant quatre minutes, pour éviter les erreurs sur la mise en train du compteur et sur l'instant de son arrêt

Il semble résulter des formules, que ce genre d'expériences devrait être très-exact pour donner la valeur de k elle-même, c'est-à-dire le rapport des capacités de l'air, car on aurait (48 et 49) :

$$v^2 = \frac{gh}{d} \cdot k, \quad \text{et} \quad v^2 = n^2 l^2.$$

Mais Dulong s'est assuré que, si le nombre n des vibrations peut être déterminé avec une grande exactitude, il n'en est pas de même de l, c'est-à-dire de la longueur de l'onde, soit qu'on emploie pour la déterminer un tuyau ouvert, un tuyau fermé par le piston, ou même la distance de deux nœuds de vibration, comme l'avait indiqué Poisson (*Mémoires de l'Académie des sciences*, 1817). Toutes les vitesses que l'on obtient ainsi sont trop petites, lorsqu'on les compare à la vitesse donnée par la formule de Newton, en adoptant 333 pour la vitesse à 0, comme toutes les expériences faites en différents lieux l'indiquent, et en adoptant par conséquent 1,421 pour la valeur de k. Dulong explique ce désaccord entre la théorie et l'observation, par la courbure inconnue de la surface nodale qui termine les ondes, et par l'incertitude qui en résulte sur la vraie valeur de l : heureusement, les nombres rapportés plus haut, pour les différents gaz, sont à l'abri de ces incertitudes, par les soins que Dulong

Digitized by Google

a mis à bien constater que les positions des surfaces nodales, dans le même tuyau, sont parfaitement identiques dans les gaz les plus différents, de telle sorte que la valeur de l disparaît lorsqu'on emploie le même tuyau et le même mode de vibration pour tous les gaz. Tels sont les motifs qui ont décidé Dulong à accepter pour l'air le nombre 1,421, qui résulte des expériences atmosphériques sur la vitesse du son, pour déterminer ensuite, au moyen de cette première donnée, les nombres relatifs aux autres gaz.

261. MM. Clément et Desormes ont été conduits à un autre système d'expériences qui peut donner aussi le rapport des capacités de l'air (*Journal de Physique*, 1819). Voici en quoi il consiste.

On raréfie un peu l'air dans un grand ballon a (Pl. 46, Fig. 21), de manière que sa pression soit p; on ouvre ensuite rapidement la clef, à large ouverture c, pour laisser rentrer l'air jusqu'à ce qu'il arrive à la pression extérieure p', ce qui dure à peu près une demi-seconde; on referme immédiatement la clef, et l'on observe la pression définitive p'' quand l'air du ballon est revenu à la température ambiante qui doit rester tout à fait invariable; les pressions $p-p'$ et $p-p''$ s'observent au moyen de la colonne d'eau d, afin de les obtenir avec plus d'exactitude; on les transforme ensuite en colonne de mercure.

Dans cette expérience, l'air qui était primitivement dans le ballon éprouve une diminution de volume ou une compression dont il est facile d'avoir la valeur : soit t la température ambiante; avant l'ouverture l'air avait une température t, un volume v', et une pression p'; après l'expérience, lorsque la température est revenue à t, il a un volume moindre v'' et une pression plus grande p'', parce qu'il est rentré de l'air extérieur; à la même température, ces deux volumes v' et v'' sont en raison inverse des pressions, ce qui donne

$$\frac{v''}{v'}=\frac{p'}{p''};\quad \text{d'où}\quad \frac{v'-v''}{v'}=\frac{p''-p'}{p''}=\delta.$$

Telle est donc la réduction de volume que la pression atmosphérique p fait subir à l'air.

L'accroissement de température t, qui est résulté de cette compression, a été tel, qu'en se dissipant, la pression est tombée de p à p''; en le rétablissant, la pression repasserait de p'' à p.

Digitized by Google

Or, dans le même espace, les pressions étant proportionnelles aux volumes qui tendent à s'établir.

$$\frac{1+a(t+t_1)}{1+at}=\frac{p}{p''}; \quad \frac{at_1}{1+at}=\frac{p-p''}{p''}.$$

Quant à l'accroissement de température t_1, il doit être tel, d'après sa définition, que l'augmentation de volume qu'il donne au volume primitif, sous la même pression, soit égale à δ ou à $\frac{p''-p'}{p''}$; cette augmentation est

$$\frac{at_1}{1+at}; \quad \text{donc} \quad \frac{at_1}{1+at}=\frac{p''-p'}{p''}.$$

par conséquent

$$\frac{t_1}{t}=\frac{p-p''}{p''-p'}; \quad \text{et} \quad k=1+\frac{p-p''}{p''-p'}.$$

C'est ainsi que MM. Clément et Desormes ont trouvé $k=1,35$.

Les expériences se faisaient avec un ballon de 28 litres. Voici l'un des résultats :

$$p=766^{mm},5;\ p-p'=13^{mm},8;\ p-p''=3^{mm},6.$$

Ce procédé ne peut donner qu'une approximation ; quelque rapide que soit l'expérience, il y a toujours de la chaleur absorbée par les parois du vase, le réchauffement de l'air en est diminué ; p' est par conséquent trop grand, et par suite la valeur de k trop petite. Ces expériences cependant ont été utiles, car c'est après en avoir connu les résultats, que Laplace a fait faire entre Villejuif et Montlhéry les expériences de vitesse du son que nous avons rapportées (liv. IV, chap. II et chap. VI).

262. La capacité des gaz change avec leur élasticité; et comme toute compression dégage de la chaleur, il en résulte que la capacité diminue, suivant une certaine loi, à mesure que la pression augmente. D'après Poisson (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXIII, p. 341), cette loi peut être exprimée par la formule suivante :

$$x=c.\left(\frac{760}{p}\right)^{1-\frac{1}{k}}.$$

c est la capacité sous la pression de 760, x la capacité sous la

pression p, et k le nombre 1,421 qui appartient à tous les gaz simples, et que l'on suppose être lui-même indépendant de la pression.

263. Nous avons réuni dans les tableaux suivants l'ensemble des résultats divers auxquels on est parvenu sur les capacités des corps pour la chaleur.

I. *Capacités déterminées par Dulong et Petit (méthode du refroidissement).*

NOMS DES SUBSTANCES.	CAPACITÉS, celle de l'eau étant prise pour unité.	POIDS des atomes, l'atome d'oxygène étant 1.	PRODUITS du poids de chaque atome par la capacité correspondante.
Bismuth	0,0288	13,30	0,3830
Plomb	0,0293	12,95	0,3794
Or	0,0298	12,43	0,3704
Platine	0,0314	11,16	0,3740
Étain	0,0514	7,35	0,3779
Argent	0,0557	6,75	0,3759
Tellure	0,0912	4,03	0,3675
Zinc	0,0927	4,03	0,3736
Cuivre	0,0949	3,957	0,3755
Nickel	0,1055	3,69	0,3819
Fer	0,1100	3,392	0,3731
Cobalt	0,1498	2,46	0,3685
Soufre	0,1880	2,011	0,3780

II. *Capacités déterminées par Dulong et Petit (méthode des mélanges).*

NOMS DES SUBSTANCES.	CAPACITÉS moyennes entre 0 et 100°.	CAPACITÉS moyennes entre 0 et 300°.
Eau	1,0000	»
Mercure	0,0330	0,0350
Platine	0,0335	0,0355
Antimoine	0,0507	0,0547
Argent	0,0557	0,0611
Zinc	0,0927	0,1015
Cuivre	0,0940	0,1013
Fer	0,1098	0,1218
Verre	0,1770	0,1900

Digitized by Google

III. *Capacités moyennes du platine (méthode des mélanges)*: *M. Pouillet*, voy. p. 565.

TEMPÉRATURE.	CAPACITÉ MOYENNE.
100°	0,03350
300	0,03434
500	0,03518
700	0,03602
1000	0,03728
1200	0,03818

IV. *Capacités déterminées par diverses méthodes.*

NOMS DES SUBSTANCES.	CAPACITÉS.	EXPÉRIMENTATEURS.
Arsenic	0,081	Avogrado.
Iode	0,089	*Id.*
Carbone	0,250	*Id.*
Phosphore	0,385	*Id.*
Chlorure de sodium	0,230	Dalton.
Huile d'olive	0,309	Lavois. et Lapl.
Acide sulfurique (densité 1,84)	0,350	Dalton.
Essence téréb. (*Id.* 0,87)	0,472	Despretz.
Éther sulfur. (*Id.* 0,71)	0,520	*Id.*
Alcool (*Id.* 0,79)	0,622	*Id.*
Acide nitrique (*Id.* 1,30)	0,660	Dalton.
Bois divers de 0,600 à	0,650	Mayer.

V. *Capacités des gaz déterminées par Delaroche et M. Bérard.*

NOMS DES SUBSTANCES.	CAPACITÉS à volumes égaux, celle de l'air étant 1.	CAPACITÉS à masses égales, celle de l'air étant 1.	CAPACITÉS à masses égales, celle de l'eau étant 1.
Air atmosphérique	1,0000	1,0000	0,2669
Hydrogène	0,9033	12,3401	3,2936
Oxygène	0,9765	0,8848	0,2361
Azote	1,0000	1,0318	0,2754
Oxyde de carbone	1,0340	1,0805	0,2884
Acide carbonique	1,2583	0,8280	0,2210
Oxyde d'azote	1,3503	0,8878	0,2369
Gaz oléfiant	1,5530	1,5763	0,4207
Vapeur aqueuse	1,9600	3,1360	0,8470

Digitized by Google

VI. *Rapports des capacités, à pression constante et à volume constant, déterminés par Dulong.*

NOMS DES GAZ.	RAPPORTS des CAPACITÉS.	CAPACITÉS à PRESSION CONSTANTE.
Air atmosphérique	1,421	1,00
Oxygène	1,415	1,00
Hydrogène	1,407	1,00
Acide carbonique	1,339	1,17
Oxyde de carbone	1,428	1,00
Oxyde d'azote	1,343	1,16
Gaz oléfiant	1,240	1,53

VII. *Capacités des corps simples et composés, déterminées par M. Regnault.*

NOMS DES SUBSTANCES.	CAPACITÉS.	POIDS atomiques, l'atome d'oxygène étant 100.	PRODUIT.
DÉTERMINATIONS PRÉLIMINAIRES.			
Laiton	0,09391		
Verre	0,19768		
Eau	1,0080		
Essence de térébenthine	0,42593		
CORPS SIMPLES, PURS.			
Fer	0,11379	339,21	38,597
Zinc	0,09555	403,23	38,526
Cuivre	0,09515	395,70	37,849
Cadmium	0,05669	696,77	39,502
Argent	0,05701	675,80	38,527
Arsenic	0,08140	470,04	38,261
Plomb	0,03140	1294,50	40,647
Bismuth	0,03084	1330,37	45,034
Antimoine	0,05077	806,45	40,944
Étain des Indes	0,05623	735,29	41,345
Nickel	0,10863	369,68	40,160
Cobalt	0,10696	368,99	39,468
Platine laminé	0,03243	1233,50	39,993
Palladium	0,05927	665,90	39,468
Or	0,03244	1243,01	40,328
Soufre	0,20259	201,17	40,754
Séléuium	0,0837	494,58	41,403
Tellure	0.05155	801,76	41,549
Iode	0,05412	789,75	42,703
Mercure	0,03332	1265,82	42,149
CORPS SIMPLES, MOINS PURS.			
Urane	0,06190	677,84	41.960
Tungstène	0,03636	1183,00	43,002

NOMS DES SUBSTANCES.	CAPACITÉS.	POIDS atomiques, l'atome d'oxygène étant 100.	PRODUIT.
Suite des corps simples, moins purs.			
Molybdène	0,07218	598,52	43,163
Nickel carburé	0,11192	369,68	41,376
Id. plus carburé	0,11631	369,68	42,999
Cobalt carburé	0,11714	368,99	43,217
Acier Hausmann	0,11848	339,21	40,172
Id. fine métal	0,12728	339,21	»
Fonte de fer blanche	0,12983	339,21	44,038
Charbon	0,24111	152,88	36,873
Phosphore	0,1887	196,14	37,024
Iridium impur	0,03683	1233,50	45,428
Manganèse très-carburé	0,14411	345,89	49,848
ALLIAGES MÉTALLIQUES.			
1 plomb 1 étain	0,04073	1014,9	41,34
1 *id.* 2 *id.*	0,04506	921,7	41,53
1 *id.* 1 antimoine	0,03880	1050,5	40,76
1 bismuth 1 étain	0,04000	1032,8	41,31
1 *id.* 2 *id.*	0,04504	933,7	42,05
1 *id.* 2 *id.* 1 antimoine	0,04621	901,8	41,67
1 *id.* 2 *id.* 1 *id.* 2 zinc	0,05657	735,6	41,61
1 plomb 2 *id.* 1 bismuth	0,04476	1023,9	45,83
1 *id.* 2 *id.* 2 *id.*	0,06082	1088,2	66,00
1 mercure 1 *id.*	0,07294	1000,5	72,97
1 *id.* 2 *id.*	0,06591	912,1	60,12
1 *id.* 1 plomb	0,03827	1280,1	48,90
OXYDES RO.			
Protoxyde de plomb, en poudre	0,05118	1394,5	71,34
Id. *id.* fondu	0,05089	1394,5	70,94
Oxyde de mercure	0,05179	1365,8	70,74
Protoxyde de manganèse	0,15701	445,9	70,01
Oxyde de cuivre	0,14201	495,7	70,39
Id. de nickel	0,16234	469,6	76,21
Id. *id.* calciné à la forge	0,15885	469,6	74,60
Moyenne	....	....	72,03
Magnésie	0,24394	258,1	63,03
Oxyde de zinc	0,12480	503,2	62,77
OXYDES R^2O^3.			
Peroxyde de fer (fer oligiste)	0,16695	978,4	163,35
Colcothar peu calciné	0,17569	978,4	171,90
Id. calciné 2 fois	0,17167	978,4	168,00
Id. fortement calciné			
Id. *id.* une 2e fois	0,16814	978,4	164,44
Acide arsénieux	0,12786	1240,1	158,56
Oxyde de chrome	0,17960	1003,6	180,01
Id. de bismuth	0,06053	2960,7	179,22
Id. d'antimoine	0,09009	1912,9	172,34
Moyenne	....	....	169,73
Alumine (corindon)	0,19762	642,4	126,87
Id. (saphir)	0,21722	642,4	139,61

Digitized by Google

NOMS DES SUBSTANCES.	CAPACITÉS.	POIDS atomiques, l'atome d'oxygène étant 100.	PRODUIT.
OXYDES RO^2.			
Acide stannique	0,09326	935,3	87,23
Id. titanique (artificiel)	0,17164	503,7	86,45
Id. *id.* (rutile)	0,17032	503,7	85,79
Moyenne			86,49
Id. antimonieux	0,09535	1000,5	95,92
OXYDES RO^3.			
Acide tungstique	0,07983	1483,2	118,38
Id. molybdique	0,13240	898,5	118,96
Id. silicique	0,19132	577,5	110,48
Id. borique	0,23743	436,0	103,52
OXYDES COMPLEXES.			
Oxyde de fer magnétique	0,16780	1417,6	237,87
SULFURES RS.			
Protosulfure de fer	0,13570	540,4	73,33
Sulfure de nickel	0,12813	570,8	73,15
Id. de cobalt	0,12512	570,0	71,34
Id. de zinc	0,12303	604,4	74,35
Id. de plomb	0,05086	1495,6	76,00
Id. de mercure	0,05117	1467,0	75,06
Protosulfure d'étain	0,08365	936,5	78,34
Moyenne			74,51
SULFURES R^2S^3.			
Sulfure d'antimoine	0,08403	2216,4	186,21
Id. de bismuth	0,06002	3264,2	195,90
Moyenne			191,06
SULFURES RS^2.			
Bisulfure de fer	0,13009	741,6	96,45
Id. d'étain	0,11932	1137,7	135,66
Sulfure de molybdène	0,12334	1001,0	123,46
Moyenne			129,50
SULFURES R^2S.			
Sulfure de cuivre	0,12118	992,0	120,21
Id. d'argent	0,07460	1553,0	115,86
SULFURES COMPLEXES.			
Pyrite magnétique	0,16023	»	»
CHLORURES R^2Cl^2.			
Chlorure de sodium	0,21401	733,5	156,97
Id. de potassium	0,17295	932,5	161,19
Pr. *id.* de mercure	0,05205	2974,2	154,80
Id. *id.* de cuivre	0,13827	1234,0	156,83
Id. d'argent	0,09109	1794,2	163,42
Moyenne			158,64

NOMS DES SUBSTANCES.	CAPACITÉS.	POIDS atomiques, l'atome d'oxygène étant 100.	PRODUIT.
CHLORURES RCl^2.			
Chlorure de barium	0,08957	1299,5	116,41
Id. de strontium	0,11990	989,9	118,70
Id. de calcium	0,16420	698,6	114,72
Id. de magnésium	0,19460	601,0	118,51
Id. de plomb	0,06641	1737,1	115,35
Pr. *id.* de mercure	0,06889	1708,4	117,68
Id. de zinc	0,13618	845,8	115,21
Pr. *id.* d'étain	0,10161	1177,9	119,59
Moyenne			117,03
Chlorure de manganèse	0,14255	788,5	112,51
CHLORIDES VOLATILS RCl^4.			
Chloride d'étain	0,14759	1620,5	239,18
Id. de titane	0,19145	1188,9	227,63
Moyenne			233,40
CHLORIDES VOLATILS R^2Cl^6.			
Chlorure d'arsenic	0,17604	2267,8	399,26
Id. de phosphore	0,20922	1720,1	359,86
Moyenne			379,51
BROMURES R^2Br^2.			
Bromure de potassium	0,11322	1468,2	166,21
Id. d'argent	0,07391	2330,0	173,34
Moyenne			169,78
Bromure de sodium	0,13842	1269,2	175,68
BROMURES RBr^2.			
Bromure de plomb	0,05326	2272,8	121,00
IODURES R^2I^2.			
Iodure de potassium	0,08191	2068,2	169,38
Id. de sodium	0,08684	1869,2	162,30
Pr. *id.* de mercure	0,03949	4109,3	162,31
Id. d'argent	0,06159	2929,9	180,45
Pr. *id.* de cuivre	0,06869	2369,7	162,81
Moyenne			167,45
IODURES RI^2.			
Iodure de plomb	0,04267	2872,8	122,54
Id. de mercure	0,04197	2844,1	119,36
Moyenne			120,95
FLUORURES RFl^2.			
Fluorure de calcium	0,21492	489,8	105,31
NITRATES $Az^2O^5+R^2O$.			
Nitrate de potasse	0,23875	1266,9	302,49
Id. de soude	0,27821	1067,9	297,13
Id. d'argent	0,14352	2128,6	305,55
Moyenne			301,72
NITRATES Az^2O^5+RO.			
Nitrate de baryte	0,15228	1633,9	248,83

Digitized by Google

NOMS DES SUBSTANCES.	CAPACITÉS.	POIDS atomiques, l'atome d'oxygène étant 100.	PRODUIT.
CHLORATES $Cl^2O^5+R^2O$.			
Chlorate de potasse	0,20956	1532,4	321,04
PHOSPHATES $P^2O^5+2R^2O$ (pyrophosphates).			
Phosphate de potasse	0,19102	2072,4	395,70
Id. de soude	0,22833	1674,4	382,22
Moyenne	....	....	389,04
PHOSPHATE P^2O^5+2RO.			
Phosphate de plomb	0,08208	3681,3	302,14
MÉTAPHOSPHATE P^2O^5+RO.			
Métaphosphate de chaux	0,19923	1248,3	248,64
PHOSPHATE P^2O^5+3RO.			
Phosphate de plomb	0,07982	4985,8	397,96
ARSÉNIATES $As^2O^5+R^2O$.			
Arséniate de potasse	0,15631	»	»
ARSÉNIATE DE PLOMB As^2O^5+3PbO.			
Arséniate de plomb	0,07280	5623,5	409,37
SULFATES SO^3+R^2O.			
Sulfate de potasse	0,19010	1091,1	207,40
Id. de soude	0,23115	892,1	206,21
Moyenne	....	....	206,80
SULFATES SO^3+RO.			
Sulfate de baryte	0,11285	1458,1	164,54
Id. de strontiane	0,14279	1148,5	164,01
Id. de plomb	0,08723	1895,7	165,39
Id. de chaux	0,19656	857,2	168,49
Id. de magnésie	0,22159	759,5	168,30
Moyenne	....	....	166,15
CHROMATES.			
Chromate de potasse	0,18505	1244,7	229,83
Bichromate de potasse	0,18937	1893,5	358,67
BORATES $B^2O^6+R^2O$.			
Borate de potasse	0,21975	1461,9	321,27
Id. de soude	0,23823	1262,9	300,88
Moyenne	....	....	311,07
BORATES B^2O^6+RO.			
Borate de plomb	0,11409	2266,5	258,60
BORATES $B^2O^6+2R^2O$.			
Borate de potasse	0,20478	1025,9	219,52
Id. de soude	0,25709	826,9	212,60
Moyenne	....	....	216,06
BORATES B^2O^6+2RO.			
Borate de plomb	0,09046	1830,5	165,54

Digitized by Google

NOMS DES SUBSTANCES.	CAPACITÉS.	POIDS atomiques, l'atome d'oxygène étant 100.	PRODUIT.
TUNGSTATES.			
Wolfram	0,09780	»	»
SILICATES.			
Zircon	0,14558	»	»
CARBONATES CO^2+R^2O.			
Carbonate de potasse	0,21623	865,0	187,01
Id. de soude	0,27275	666,0	181,65
Moyenne	....	....	184,33
CARBONATES CO^2+RO.			
Carbonate de chaux (spath d'Islande)	0,20858	631,0	131,61
Id. *id.* (aragonite)	0,20850	631,0	131,56
Marbre saccharoïde blanc	0,21585	631,0	136,20
Id. *id.* gris	0,20989	631,0	132,45
Craie blanche	0,21585	631,0	135,57
Carbonate de baryte	0,11038	1231,9	135,99
Id. de strontiane	0,14483	922,8	133,58
Id. de fer	0,19345	714,2	138,16
Moyenne	....	....	134,40
Carbonate de plomb	0,08596	1669,5	143,55
Dolomie	0,21743	582,2	126,59

VIII. *Capacités de différents corps déterminées par M. Regnault.*

NOMS DES SUBSTANCES.	CAPACITÉS.	DENSITÉS.
Noir animal	0,26085	»
Charbon de bois	0,24150	»
Coke du Cannel-Coal	0,20307	»
Id. de houille	0,20085	»
Charbon de l'anthracite du pays de Galles	0,20171	»
Id. *id.* de Philadelphie	0,20100	»
Graphite naturel	0,20187	»
Id. des hauts fourneaux	0,19702	»
Id. des cornues de gaz	0,20360	»
Diamant	0,14687	»
Térébenthine	0,4672	»
Térébène	0,4656	»
Térébilène	0,4580	»
Camphilène	0,4518	»
Essence de citron	0,4879	»
Essence d'orange	0,4886	»
Essence de genièvre	0,4770	»
Pétrolène	0,4684	»
Acier doux	0,1165	7,8609
Id. trempé	0,1175	7,7982
Métal des cymbales aigre	0,0858	8,5797
Id. *id.* doux (trempé)	0,0862	8,6343
Larmes bataviques dures	0,1923	»
Id. *id.* recuites	01937	»
Soufre cristallisé naturel	0,1776	»
Id. fondu depuis 2 ans	0,1764	»
Id. *id.* depuis 2 mois	0,1803	»
Id. *id.* récemment	0,1844	»
Eau		
Essence de térébenthine	0,4160	»
Dissolution de chlorure de calcium	0,6448	»
Alcool ord. à 36°, n° 1	0,6588	»
Id. plus étendu, n° 2	0,8413	»
Id. encore plus étendu, n° 3	0,9402	»
Acide acétique concentré non cristallisé	0,6501	»

Digitized by Google

IX. *Capacités déterminées par M. Regnault.*

NOMS DES SUBSTANCES.	CAPACITÉS		
	de 20° à 15°.	de 15° à 10°.	de 10° à 5°.
Eau distillée	»	»	»
Essence de térébenthine	»	»	»
Dissolution de chlorure de calcium	0,6462	0,6389	0,6423
Alcool ordinaire, n° 1	0,6725	0,6651	0,6588
Id. plus étendu, n° 2	0,8518	0,8429	0,8523
Id. encore plus étendu, n° 3	0,9752	0,9682	0,9770
Alcool ordinaire	0,6774	0,6540	0,6465
Acide acétique	0,6589	0,6577	0,6609
Mercure	0,0290	0,0283	0,0282
Térébène	0,4267	0,4156	0,4154
Essence de citron	0,4504	0,4424	0,4489
Pétrolène	0,4342	0,4325	0,4321
Benzine	0,3932	0,3865	0,3999
Nitrobenzine	0,3499	0,3478	0,3524
Chlorure de silicium	0,1904	0,1904	0,1914
Id. de titane	0,1828	0,1802	0,1810
Chloride d'étain	0,1416	0,1402	0,1421
Protochlorure de phosphore	0,1991	0,1987	0,2017
Sulfure de carbone	0,2206	0,2183	0,2179
Ether	0,5157	0,5158	0,5207
Ether sulfhydrique	0,4772	0,4653	0,4715
Ether iodhydrique	0,1584	0,1584	0,1587
Alcool	0,6148	0,6017	0,5987
Ether oxalique	0,4554	0,4521	0,4629
Esprit de bois	0,6009	0,5866	0,5901
Ether iodhydrique	0,1569	0,1556	0,1574
Id. bromhydrique	0,2153	0,2135	0,2164
Chlorure de soufre	0,2038	0,2024	0,2048
Acide acétique cristallisable	0,4618	0,4599	0,4587

264. Remarques sur les tableaux précédents. — En 1819, Dulong et Petit, après avoir déterminé les chaleurs spécifiques de divers corps simples (comme on le voit tableau I précédent), ont eu l'heureuse idée de multiplier chacune de ces chaleurs spécifiques par l'équivalent chimique du corps auquel elle se rapporte, et ils ont ainsi obtenu un nombre à peu près constant (colonne 4 du tableau I); ils en ont donc tiré cette loi fondamentale : que, *pour les corps simples, les chaleurs spécifiques sont en raison inverse des équivalents chimiques.* Mais, comme dans le système atomique, les équivalents correspondent à un même nombre d'atomes, et sont, par conséquent, proportionnels aux poids des atomes, il en résulte aussi que *les chaleurs spécifiques sont en raison inverse des poids des atomes eux-mêmes*, c'est-à-dire que l'on a $cp = c' p'$, p et p étant les poids des atomes de deux corps

simples, et c et c' les *capacités de ces corps*. On voit que cp est la *quantité de chaleur* nécessaire pour faire changer de 1° le poids p du premier corps; $c'\,p'$ est, de même, la quantité de chaleur nécessaire pour faire changer de 1° le poids p' du deuxième corps ; il en résulte enfin qu'il faut des quantités de chaleur égales pour changer de 1° la température des atomes des corps simples, ou, en d'autres termes, que *les atomes des corps simples ont exactement la même capacité pour la chaleur*.

C'est sous cette dernière forme que Dulong et Petit ont présenté la loi dont il s'agit (*Ann. de Chim. et de Phys.*, 1819, t. X, p. 405). Cependant, comme les capacités se rapportent en général à des poids égaux, il m'a semblé nécessaire, pour éviter les équivoques, de bien indiquer le sens qu'il faut attacher à ces expressions.

A l'époque de cette importante découverte, les chimistes n'avaient pas tous les moyens qu'ils possèdent aujourd'hui pour déterminer la vraie valeur des équivalents, ou le véritable poids des atomes ; les lois si remarquables de l'isomorphisme, que l'on doit à M. Mitscherlich, n'étaient pas connues, et, dans un grand nombre de cas, il restait de l'indécision sur le multiple qu'il fallait adopter ; aujourd'hui, si les incertitudes ne sont pas levées d'une manière absolue par rapport à tous les corps, on connaît du moins des conditions plus nombreuses, plus tranchées et plus précises auxquelles le poids de l'atome doit satisfaire. Ainsi, la loi des capacités est un autre criterium qui vient se joindre à l'ensemble des analogies chimiques, pour les confirmer quand elles s'accordent, et pour faire connaître quelles sont les plus fondamentales quand elles ne s'accordent pas.

Cependant la loi des capacités n'est pas et ne peut pas être mathématiquement exacte, parce qu'il y a des causes accidentelles qui font varier la capacité des corps simples.

1° La capacité change avec la température, et change inégalement pour les différents corps, comme on le voit par les tableaux II, III et IX.

2° Elle change aussi avec l'état d'agrégation : pour le cuivre recuit et malléable, M. Regnault a trouvé, par exemple, 0,0950 et 0,0945, tandis que le même corps écroui et cassant donne seulement 0,0936 et 0,0933. Ces différences deviennent bien plus grandes pour le soufre : en cristaux naturels, sa capacité est 0,1776; fondu depuis deux mois, elle est 0,1803, et fondu ré-

Digitized by Google

cemment, elle est 0,1844; et elles deviennent bien plus saillantes encore pour le carbone, puisque la capacité du diamant est 0,1469, celle du graphite naturel 0,219, et celle du charbon de bois 0,2415 (tableau VIII).

Ainsi, en faisant pour les divers corps simples le produit de la capacité par le poids de l'atome, on doit trouver des nombres dont les rapports changent aussi avec la température et l'état d'agrégation; c'est-à-dire que la loi des capacités ne peut, en définitive, donner pour le poids de l'atome qu'une approximation dont il reste à apprécier la valeur.

Si nous passons maintenant des corps simples aux corps composés, ce qui est possible aujourd'hui, grâce au beau travail de M. Regnault sur ce sujet important, nous arriverons à cette loi générale, telle qu'elle a été énoncée par M. Regnault, comme conséquence du tableau VII :

Dans tous les corps composés, de même composition atomique et de constitution chimique semblable, les chaleurs spécifiques sont en raison inverse des poids atomiques.

Sur quoi il y a deux remarques à faire qui sont d'un grand intérêt pour la science :

La première, c'est que cette loi générale ne peut être non plus qu'une approximation par les raisons que nous avons indiquées pour les corps simples et qui prennent ici bien plus de force encore, parce qu'il y a des corps composés qui éprouvent un très-rapide accroissement de capacité, à mesure que la température s'élève; sans doute à cause de leur grande dilatabilité (tableau IX), et aussi parce qu'il y a bon nombre de corps composés dont l'agrégation moléculaire peut, comme celle du charbon, passer par les états les plus différents (alumine, carbonate de chaux, etc.).

La seconde, c'est que le produit de la capacité par le poids atomique change lorsqu'on passe d'une composition atomique à une autre, ou d'une constitution chimique à une autre, sans que l'on puisse jusqu'à présent se rendre compte des causes de ce changement. Ainsi ce produit change considérablement en passant des oxydes RO aux oxydes RO^2, RO^3, R^2O^3, etc.; il en est de même pour les autres composés binaires : s'il est à peu près constant pour les sulfures, chlorures, bromures, iodures et fluorures d'une même formule, il change en passant d'une formule à l'autre. Ces observations s'appliquent aussi aux sels de

Digitized by Google

diverses compositions. Toutefois, l'ensemble de ces résultats a porté M. Regnault à regarder la potasse et la soude comme ayant une composition atomique semblable à celle des oxydes de cuivre et d'argent : et cette analogie se soutient complétement dans les différents composés de potassium et de sodium.

§ 2. *Chaleur latente, chaleur des combinaisons, et mélanges réfrigérants.*

265. Calorique de fluidité. — Nous avons déjà indiqué (**123**, t. I), les observations par lesquelles on reconnaît l'absorption du *calorique latent* ou du *calorique de fluidité* pendant la liquéfaction des corps. Il est visible maintenant que ces quantités de chaleur peuvent être déterminées par les moyens qui viennent de nous servir à comparer les chaleurs spécifiques des corps ; et, entre ces moyens, celui de la méthode des mélanges mérite de beaucoup la préférence.

La détermination des chaleurs latentes a un haut degré d'intérêt : elle nous fera sans doute connaître des rapports remarquables entre la composition moléculaire des corps et le nombre des unités de chaleur qu'ils dissimulent dans leur masse par l'acte seul de la fusion. Cependant ces recherches ont été jusqu'à présent fort négligées : on s'est en général contenté d'approximations qui ne peuvent plus être admises aujourd'hui. La science attend donc à cet égard des données numériques précises qui lui manquent complétement. On peut espérer toutefois que cette lacune si regrettable ne tardera pas à disparaître : deux jeunes professeurs très-distingués, MM. de La Provostaye et Desains, viennent de publier sur la chaleur de fusion de la glace un excellent travail qui fait bien voir tout ce que l'on peut attendre des bonnes méthodes d'observation. Leurs expériences donnent pour ce nombre fondamental 79,25 au lieu de 75, qui était adopté depuis un demi-siècle, d'après les expériences calorimétriques de Lavoisier et de Laplace. Nous allons indiquer le procédé qu'ils ont suivi.

Soient m le poids de l'eau, m' celui de la glace, t la température initiale, ou celle qui a lieu au moment du mélange, t' la température finale ou celle qui a lieu quand le mélange est accompli, x la chaleur de fusion de la glace. L'eau perd en quantité de chaleur $m(t-t')$, la glace gagne $m'(x+t')$; on a donc

$$m(t-t') = m'(x+t') \quad \text{et} \quad x = \frac{m}{m'}(t-t') + t'.$$

Digitized by Google

Tout se réduit à déterminer exactement les poids m et m', et à obtenir les températures t et t' telles qu'elles devraient être, c'est-à-dire corrigées avec soin des influences du réchauffement et du refroidissement extérieur. On voit en effet qu'une erreur d'une unité commise sur $t-t'$, devient une erreur de plusieurs unités sur la chaleur latente, parce que m doit toujours être pris beaucoup plus grand que m' ; une erreur sur t' quand $t-t'$ serait cependant exact, ne donnerait sur x qu'une erreur égale.

Détermination des poids. — L'eau, le vase et le thermomètre sont pesés ensemble avant le mélange, et ensuite pesés de même après le mélange. La différence des deux pesées ne donne pas le poids de la glace, car, pendant les cinq ou six minutes que dure l'expérience, il y a une évaporation naturelle, et même une évaporation particulière, due au mode d'agitation du mélange. Cette cause de perte est déterminée par des expériences préalables ; alors, en notant le temps qui s'écoule entre la première pesée et l'instant du mélange, on connaît la première correction qui se rapporte à l'eau, et, en notant de même le temps qui s'écoule depuis l'instant du mélange jusqu'à la seconde pesée, on connaît la seconde correction qui se rapporte à la glace ; m' est ainsi exactement connu. Pour avoir m, il faut, de la première pesée, ôter d'abord le poids de l'eau évaporée jusqu'à l'instant du mélange, il en faut retrancher ensuite le poids du vase et celui du thermomètre qui sont connus, et enfin ajouter le poids du vase transformé en eau, et, également transformé en eau, le poids de la partie du thermomètre qui participe aux variations de la température.

Détermination des températures. — Le déplacement du zéro a ici une influence directe, à cause du terme t' qui entre dans la valeur de x ; il faut donc, avant tout, vérifier souvent le zéro du thermomètre dont on fait usage. La température initiale observée n'aurait pas d'autre correction à subir que celle qui résulte de cette vérification, s'il n'y en avait pas une aussi qui résulte de ce que la tige n'est pas entièrement plongée. Pour la température finale, la correction est plus complexe et exige d'autres soins ; au lieu de s'en tenir à la méthode des compensations de Rumford, MM. de La Provostaye et Desains ont adopté la méthode des vitesses dont j'ai fait usage autrefois (*Comptes rendus*, t. III, p. 785), et qui est indiquée plus haut (**256**). Soit θ la température finale observée : on la corrige d'abord de

l'erreur du zéro et de la tige, que nous représenterons par $+\theta'$, et ensuite de l'influence θ'' du refroidissement extérieur, en sorte que la température t' qu'il faut mettre dans la formule est donnée par

$$t' = \theta + \theta' - \theta''.$$

On arrive à observer θ avec exactitude, en partant d'une température initiale telle, qu'après le mélange la température tombe à 1° ou 2° au-dessous de la température ambiante, parce qu'il y a alors un minimum qui dure plusieurs secondes, le refroidissement produit par la fusion des dernières parcelles de glace faisant alors équilibre au réchauffement extérieur. Maintenant, pour arriver à la valeur de la correction θ'', à partir de l'instant où l'on a jeté la glace dans le vase du mélange, on observe, de degré en degré, les températures décroissantes et les temps correspondants : et au moyen des formules

$$t = cb^{-x} \quad \text{et} \quad v = (\text{M} \log b)\, t,$$

on calcule les excès qui ont eu lieu de 10″ en 10″, par exemple, depuis la température initiale jusqu'à la température finale, et les vitesses correspondantes. Soient v, v', v''...... ces vitesses, d l'intervalle constant que nous avons ici supposé de 10″, il est clair que pendant le premier intervalle le vase a perdu, par l'influence extérieure, une température vd, puis une température $v'd$ dans le deuxième, $v''d$ dans le troisième...., et en somme pendant la durée de l'expérience il a perdu $d(v + v' + v''....) = +\theta''$; θ'' est positif, parce que, dans cette manière de procéder, il n'y a que les dernières vitesses qui soient négatives, et elles sont petites. Cette perte de température du vase par l'influence extérieure doit être retranchée de la température finale observée θ, pour avoir le véritable abaissement de température dû à la fusion de la glace et au réchauffement de l'eau provenant de cette fusion.

Dans ces recherches, MM. de La Provostaye et Desains se sont montrés habiles observateurs, leurs nombreux résultats offrent une concordance remarquable, et le nombre

$$79{,}25$$

auquel ils arrivent, doit désormais être adopté pour le calorique de fusion de la glace.

266. Formules de M. Person pour exprimer les chaleurs

Digitized by Google

latentes des corps solides. — M. Person a été conduit par diverses considérations théoriques, à admettre que la chaleur de fusion dépend à la fois de la ténacité des corps solides et de la différence des chaleurs spécifiques du même corps à l'état solide et à l'état liquide. La série des expériences qu'il a exécutées dans cette vue, avec une rare habileté, forme un ensemble remarquable, qui mérite à un haut degré l'attention des physiciens. Je vais essayer d'indiquer en peu de mots les résultats auxquels il est parvenu. Les deux tableaux suivants contiennent les points de fusion, les chaleurs spécifiques et les chaleurs latentes des substances non métalliques et des substances métalliques qui ont été le principal objet de ses recherches (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXI, XXIV, XXVII).

SUBSTANCES NON MÉTALLIQUES.

Points de fusion, chaleurs spécifiques, chaleurs latentes.

NOMS des SUBSTANCES.	POINTS de FUSION.	CHALEUR SPÉCIFIQUE A L'ÉTAT		CHALEUR LATENTE	
		liquide.	solide.	trouvée.	calculée.
Eau	0	1,0000	0,5040	79,25	79,20
Phosphore	44,2	0,2045	0,1788	5,03	5,24
Soufre	115,0	0,2340	0,2026	9,37	9,35
Azotate de soude	310,5	0,4130	0,2782	62,98	63,40
Azotate de potasse	339,0	0,3319	0,2388	47,37	46,46
Chlorure de calcium	28,5	0,5550	0,3450	40,70	39,58
Phosphate de soude	36,1	0,7467	0,4077	66,80	66,48

SUBSTANCES MÉTALLIQUES.

Points de fusion, chaleurs spécifiques, chaleurs latentes.

NOMS des SUBSTANCES.	POINTS DE FUSION SUR LE THERMOMÈTRE		CHALEUR SPÉCIFIQUE A L'ÉTAT		CHALEUR latente.	LIMITES pour l'état liquide.
	à mercure.	à air.	liquide.	solide.		
Étain	235,0	232,7	0,0637	0,0562	14,25	250 et 350
Bismuth	270,5	266,8	0,0363	0,0308	12,64	280 et 380
Plomb	334,0	326,2	0,0402	0,0314	5,37	350 et 450
Zinc	433,3	415,3	»	0,0956	28,13	»
Cadmium	328,0	320,7	0,0642	0,0567	13,58	»
Argent	»	»	»	0,0570	21,07	»

Pour les substances non métalliques, M. Person exprime la chaleur latente λ par la formule

$$\lambda = (\theta + t)(l - s),$$

l, chaleur spécifique à l'état liquide;

s, chaleur spécifique à l'état solide;

t, température du point de fusion;

θ, constante qui reste la même pour tous les corps et dont la valeur a été trouvée égale à 160.

Les chaleurs latentes calculées, contenues dans la dernière colonne du tableau, sont celles qui résultent de cette formule, lorsqu'on y introduit pour θ la valeur 160 et pour t, l, s, les nombres donnés directement par l'expérience. On voit qu'il y a une coïncidence remarquable entre ces résultats et ceux de la colonne précédente qui contient les déterminations expérimentales.

M. Person a constaté de plus que la chaleur latente d'un corps change avec le point de congélation : soit, en effet, 1 kilogramme d'eau à 0, s'il se gèle à 0 pour descendre ensuite à 10° au-dessous de 0, il perd une quantité de chaleur $\lambda + 10s$; s'il se refroidit d'abord à 10° au-dessous de 0 pour se congeler ensuite, il perd $10c + \lambda'$ en appelant c la capacité de l'eau liquide au-dessous de zéro, et λ' sa chaleur latente à $-10°$; et il faut que l'on ait $\lambda + 10s = \lambda' + 10c$, ou $\lambda - \lambda' = 10(c - s)$; pour que λ' fût égal à λ il faudrait que l'on eût $c = s$. Or, en faisant refroidir de l'eau entre quelques degrés au-dessus de zéro et plusieurs degrés au-dessous, M. Person a reconnu que la loi de refroidissement se continue avec régularité, ce qui prouve que la capacité ne change pas tant que l'eau reste liquide; ainsi,

$$c = l, \quad \text{et} \quad \lambda - \lambda' = 10(l - s) = 5.$$

A 10° au-dessous de 0, la chaleur latente de l'eau est donc diminuée de 5 unités.

Le tableau des substances métalliques fait voir de suite que la formule précédente cesse d'être applicable; pour tous les métaux elle donnerait des chaleurs latentes trop faibles. Alors M. Person a cherché à établir quelque dépendance entre la chaleur latente et les coefficients d'élasticité; et, en définitive, il propose la formule

$$\frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon'}\left(\frac{2 + \sqrt{p}}{2 + \sqrt{p'}}\right)\frac{\sqrt{p'}}{\sqrt{p}},$$

dans laquelle les quantités λ, ε, p, sont la chaleur latente, le coefficient d'élasticité et le poids spécifique d'un premier métal, λ', ε', p', les quantités homologues pour un second métal; ainsi dans cette classe de corps toutes les chaleurs latentes se déduiraient de l'une d'entre elles. Pour le zinc, par exemple, on a $\lambda' = 28,13$; $\varepsilon' = 9640$; $p' = 7$; ce qui donnerait pour un autre métal quelconque

$$\lambda = 0,001669.\varepsilon.\left(\frac{2+\sqrt{p}}{\sqrt{p}}\right].$$

Ces rapprochements méritent une sérieuse attention. Il faut remarquer cependant que leur valeur théorique est peut-être un peu diminuée par cette circonstance qu'il y aurait en quelque sorte trois espèces de fusion, et trois modes différents pour établir la dépendance de la chaleur latente avec les autres propriétés des corps. Le premier mode correspond au premier des tableaux précédents, l'expression de la chaleur latente y est absolue et ne dépend que des chaleurs spécifiques à l'état liquide et à l'état solide. Le deuxième mode correspond au second tableau, l'expression de la chaleur latente n'est plus absolue, elle est relative; il faut une des chaleurs latentes pour obtenir les autres; il y a aussi quelque chose d'arbitraire dans le rôle que vient y prendre le poids spécifique; enfin les coefficients d'élasticité éprouvent avec la température des changements si considérables qu'il paraît difficile que les chaleurs latentes éprouvent des changements analogues, puisque la fusion les modifie si peu. Le troisième mode correspondrait aux corps qui ont la propriété de se ramollir avant la fusion, comme la cire, le spermacéti, et la plupart des corps gras, dont la chaleur spécifique et la chaleur latente sont très-variables et semblent échapper à toutes les lois, comme M. Person l'a démontré lui-même.

Il y a d'ailleurs, pour certains corps, beaucoup d'incertitude sur les chaleurs spécifiques qu'il convient de choisir lorsqu'on veut employer la première formule; les observations que M. Person a faites à ce sujet sont confirmées par les résultats récents de M. Regnault (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXVI, ann. 1849).

	Chaleur spécifiq.
Phosphore, entre — 78° et + 10°	0,1740
Id. entre + 10 et + 30	0,1887
Glace, entre — 78 et 0	0,4740
Glace, entre — 20 et 0 (MM. Person et Desains)	0,5010

M. Regnault a soin d'indiquer que ces déterminations pour les basses températures sont obtenues par comparaison avec le plomb, en prenant pour sa chaleur spécifique 0,0314 ; et, comme il donne un peu plus loin 0,03065 pour la chaleur spécifique du plomb entre — 78° et 10°, il en résulte que les chaleurs spécifiques du phosphore et de la glace deviendraient même 0,1699 et 0,4627, au lieu de 0,1740 et 0,4740.

Brome,	à l'état liquide,	entre 13°	et 58°	0,1129
Id.	*id.*	11	et 48	0,1109
Id.	*id.*	— 6	et + 10	0,1051
Id.	à l'état solide,	— 77, 75	et — 15	0,0843
Mercure,	à l'état liquide,	0	et 100	0,0333
id.	à l'état solide,	— 77, 75	et — 40	0,0319
Potassium	*id.*	— 77, 75	et — 10	0,1655

M. Regnault a trouvé 16,18 pour la chaleur latente du brome ; aussi M. Person a-t-il été conduit à le ranger parmi les substances dont la chaleur latente s'obtient par des coefficients d'élasticité ; la différence de ses chaleurs spécifiques à l'état liquide et à l'état solide est cependant proportionnellement plus grande que pour le phosphore ; celle-ci est 0,17, l'autre 0,25.

M. Person a signalé deux faits curieux que présentent les alliages fusibles, savoir : l'alliage de d'Arcet, $Bi^4Pb^2Sn^2$, fusible à 96° ; l'alliage de Rose, Bi^2PbSn^2 fusible à 94° ; l'alliage Bi^4Pb^2, fusible à 122°,4 ; l'alliage Bi^4Sn^4, fusible à 135°,3.

Le premier fait est celui d'un dégagement de chaleur qui se manifeste lorsque les métaux fondus qui doivent composer l'alliage sont mis en contact à la même température.

Le second fait est celui d'un dégagement de chaleur qui se produit dans l'alliage déjà solidifié et pendant qu'il se refroidit, lorsqu'il atteint une certaine température au-dessous de son point de solidification. Pour l'alliage de d'Arcet ce phénomène se manifeste à 57°, mais il ne commence qu'à 36° quand le refroidissement a été rapide ; alors la température remonte de 36° à 70°.

Digitized by Google

En même temps les métaux changent d'aspect, la cassure devient terne, et la chaleur spécifique est elle-même modifiée, elle devient égale à celle du mélange des éléments. M. Person pense que les métaux se séparent; il me paraît certain cependant que la séparation n'est pas complète, puisque le point de fusion de la masse n'en reste pas moins à 96°, quand tous ces phénomènes se sont accomplis.

267. Calorique d'élasticité. — Nous appellerons ainsi le *calorique latent* qu'un liquide absorbe en se vaporisant : son existence nous est démontrée par la fixité de la température pendant l'ébullition des liquides, et par le refroidissement produit pendant leur évaporation. Le calorique d'élasticité qui est propre à chaque vapeur se détermine, en général, par la méthode suivante : on fait bouillir le liquide à une température connue t; sa vapeur vient parcourir les plis du serpentin d'un calorimètre a (Pl. 47, Fig. 22), analogue à celui de MM. Delaroche et Bérard; là, elle se condense et se rassemble dans la caisse inférieure b; le tube droit c se ferme lorsqu'on opère sous une pression moindre que celle de l'atmosphère après avoir fait le vide dans l'appareil, et il peut rester ouvert lorsqu'on opère sous la pression atmosphérique. Le poids du liquide vaporisé s'estime par la perte que la cornue a faite, et, pour contrôle, on peut peser aussi le liquide r rassemblé dans la caisse b. Pour éviter des corrections qui seraient incertaines, on met d'abord le calorimètre, par exemple, à une température de r^{o} au-dessous de la température ambiante θ, et l'on poursuit l'expérience jusqu'à ce qu'il arrive à r^{o} au-dessus avec l'attention d'employer des temps égaux de part et d'autre de la température ambiante; alors le calorimètre gagne autant par l'effet extérieur pendant la première moitié de l'expérience, qu'il perd pendant la seconde moitié.

Soit maintenant m la masse corrigée du calorimètre; comme il s'élève de $2r^{o}$, il gagne de la part de la vapeur une quantité de chaleur $2rm$. Soient m' le poids de la vapeur qui est arrivée dans le serpentin, c' la capacité du liquide qui résulte de sa condensation; ce liquide étant, en définitive, à la température $\theta + r$, et s'étant condensé à la température t, à laquelle la vapeur entre dans le serpentin, s'est refroidi de $t - \theta - r$, et a, par conséquent, donné au calorimètre une quantité de chaleur $m'c'(t - \theta - r)$. D'ailleurs, dans l'acte de la condensation, chaque unité de la

masse m' de vapeur a abandonné une quantité inconnue x de chaleur latente, ou en somme $m'x$.

On a donc :

$$m'x + m'c'(t - \theta - r) = 2rm;$$

d'où l'on déduit la valeur de x.

Pour donner de la précision à l'expérience, il importe surtout d'agiter sans cesse le liquide du calorimètre au moyen de l'agitateur dont il est pourvu, et de prendre toutes les précautions possibles pour que la vapeur n'emporte pas des gouttelettes liquides qui n'auraient point à déposer de chaleur latente.

On a trouvé ainsi les résultats suivants :

Eau.	537
Alcool.	207,7
Éther sulfurique.	96,8
Essence de térébenthine.	76,8;

c'est-à-dire que 1 kilogramme de vapeur de ces différents liquides, en se condensant sans changer de température, est capable d'élever de 1° un poids d'eau de 537 kilogrammes, de 207,7, etc.

Les trois derniers résultats sont dus à M. Despretz; il avait obtenu 531 pour la vapeur d'eau; Rumford donnait 567; Dulong, 543. M. Regnault donne 537, MM. Favre et Silbermann 536. On peut donc, sans craindre une trop grande erreur, adopter définitivement 537.

263. En partant de la formule fondamentale que Laplace a établie sur la théorie des fluides élastiques (livre XII^e de la *Mécanique céleste*), je suis parvenu aux relations suivantes entre les diverses données qui caractérisent les vapeurs. (Voy. les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 31 mai 1847.)

[1] $$q - q_1 = c_1(a + t_1)(\gamma - 1).$$

[2] $$\gamma = \frac{a+t}{a+t_1} \cdot \left(\frac{p_1}{p}\right)^z.$$

[3] $$\frac{c}{c_1} = \left(\frac{p_1}{p}\right)^z.$$

[4] $$\frac{d}{d_1} = \left(\frac{p}{p_1}\right)^{1-z}.$$

[5] $$z = \frac{\log(a+t) - \log(a+t_1)}{\log p - \log p_1}.$$

[6] $$\lambda = \lambda_1 + (q - q_1) - s(t - t_1).$$

Digitized by Google

a est l'unité divisée par le coefficient de dilatation de la vapeur, z représente $\frac{k-1}{k}$, k étant le *coefficient de capacité* de la vapeur, c'est-à-dire le rapport de sa capacité à pression constante à sa capacité à volume constant; s, chaleur spécifique du liquide qui donne naissance à la vapeur.

q et q_1, quantités absolues de chaleur que possède 1 kilogramme de vapeur aux maximum de tensions p et p_1 et aux températures correspondantes t et t_1; d et d_1 représentent, dans les mêmes conditions, les densités de la vapeur, c et c_1 les chaleurs spécifiques à pression constante; enfin λ et λ_1 les chaleurs latentes.

J'ai fait voir de plus :

1° Que si dans l'équation [5] on substitue pour p et p_1 deux tensions maximun quelconques, et pour t et t_1 les températures correspondantes, on obtient pour z une série de valeurs croissantes ou décroissantes dont aucune ne peut être exacte;

2° Que la vraie valeur de z est plus petite que la plus petite des valeurs de cette série, ou plus grande que la plus grande;

3° Que dans le premier cas la différence des quantités de chaleur $q-q_1$ est croissante à mesure que la température s'élève, et qu'au contraire, dans le second cas, elle est décroissante; ce qui donne pour les vapeurs deux types différents, l'un à chaleur croissante, l'autre à chaleur décroissante;

4° Que la vapeur d'eau appartient au premier type, c'est-à-dire, qu'un kilogramme de vapeur d'eau, pris au maximum de la tension, contient une quantité absolue de chaleur d'autant plus *grande* que la température est plus élevée;

5° Que l'acide carbonique appartient au contraire au second type, c'est-à-dire qu'un kilogramme de vapeur d'acide carbonique, pris au maximum de tension, contient une quantité absolue de chaleur d'autant plus *petite* que la température est plus élevée;

6° Qu'en vertu de l'équation [6] les chaleurs latentes sont liées aux quantités absolues de chaleur, de telle sorte qu'il suffit souvent de connaître deux chaleurs latentes d'une vapeur correspondant à des températures un peu éloignées pour découvrir auquel des deux types cette vapeur appartient. Ainsi, pour la vapeur d'eau, j'ai trouvé qu'à la température zéro la chaleur

Digitized by Google

latente $\lambda_1 = 560$; on sait qu'à 100° on a $\lambda = 537$, par conséquent

$$q - q_1 = 100 - 23 = 77,$$

c'est-à-dire que le kilogramme de vapeur d'eau au maximum à 100° contient 77 unités de chaleur de plus qu'à la température zéro.

Avec cette donnée on peut déterminer la valeur de k, qui me paraît être comprise entre

$$k = 1,020 \quad \text{et} \quad k = 1,030.$$

Il devient dès lors facile de déterminer les chaleurs spécifiques à pression constante et les densités correspondant à des pressions données.

Je regrette de ne pouvoir donner ici plus d'étendue à cette discussion importante; mais je vais encore, en peu de mots, indiquer le procédé dont j'ai fait usage pour déterminer les chaleurs latentes à la température zéro. L'appareil est représenté (Pl. 47, Fig. 6). « a est un tube de verre mince d'environ 1 centimètre de diamètre et 20 centimètres de longueur, d'un poids connu, contenant quelques grammes d'eau qui ont été pesés avec soin, et qui sont destinés à l'évaporation. Pour recueillir la chaleur latente qu'ils doivent prendre pendant le changement d'état, on fait plonger le tube dans un bain refroidi jusqu'à une température voisine de zéro, dont on observe la loi de réchauffement; ce bain se compose lui-même d'une centaine de grammes d'eau contenus dans une cloche mince de verre b, de 4 ou 5 centimètres de diamètre et d'une hauteur suffisante. Afin d'empêcher la condensation des vapeurs extérieures sur les parois de la cloche, elle est ajustée avec un bouchon dans un vase cylindrique de verre c, de 12 ou 15 centimètres de diamètre, et d'une assez grande hauteur pour que la couche d'acide sulfurique qui en couvre le fond n'exerce pas une action trop directe sur la partie inférieure de la cloche. On évite ainsi et la condensation des vapeurs et l'effet des courants d'air, qui troubleraient l'un et l'autre la loi du réchauffement.

« L'eau du bain doit avoir un niveau de quelques centimètres plus élevé que le niveau de l'eau dans le tube d'évaporation; elle doit être agitée régulièrement avec un agitateur convenable g; la température est indiquée par un thermomètre t que l'on observe au cathétomètre.

« Les choses ainsi disposées, on détermine avec soin la durée du réchauffement de demi-degré en demi-degré, par exemple depuis 3 ou 4° jusqu'à 7 ou 8°. Pendant cette première période, il n'y a aucune évaporation dans le tube; il communique, il est vrai, avec la machine pneumatique, ou plutôt avec une cloche sous laquelle il y a de l'acide sulfurique concentré, mais le vide n'est pas fait. Le réchauffement étant parvenu à 8 degrés, la seconde période commence, c'est-à-dire que l'on fait le vide rapidement, et cependant avec assez de précautions pour que l'ébullition soit modérée, sans soubresaut ni projection de liquide. A l'instant la marche du réchauffement se ralentit; on pourrait même faire retomber le thermomètre à 7°,5, ou du moins le maintenir près de 8° pendant 10 ou 12 minutes, qui est le temps nécessaire pour vaporiser de 1 à 2 grammes d'eau; alors on rend l'air, et, pour plus de sûreté pendant cette troisième et dernière période, on continue d'observer encore la loi du réchauffement jusqu'à 10 ou 11°, la température ambiante étant d'environ 20°.

« Ces indications suffisent, sans entrer dans plus de détails, pour faire voir que cette méthode atteint le but. Connaissant, par une nouvelle pesée, le poids de l'eau qui s'est évaporée; connaissant le temps pendant lequel le bain, avec tout ce qui le constitue, a été maintenu entre 7 et 8°, par l'effet de l'évaporation, et ce qu'il a dû recevoir de chaleur dans cet intervalle, il est facile d'en déduire la quantité de chaleur que l'évaporation elle-même lui a enlevée.

« Plusieurs expériences, dont les résultats sont assez concordants, me donnent environ 560 unités pour la chaleur latente de la vapeur d'eau à 0°.

« La principale difficulté de ces expériences résulte d'un phénomène dont, je l'avoue, je n'avais pas tenu assez de compte dans mes prévisions. Les préparateurs ont tant de peine à faire réussir dans les leçons l'expérience de Leslie, que je ne m'attendais pas à rencontrer ici, comme un obstacle, la congélation par le vide; c'est cependant ce qui arrive. Le liquide qui fournit à l'évaporation se trouve, comme nous l'avons dit, environné par l'eau du bain, dont la température est de 7 ou 8°, et qui, de plus, est agitée vivement, surtout autour du point où le froid se produit; malgré ce réchauffement considérable, la couche superficielle se gèle sans cesse, quand on ne ménage pas l'opé-

ration avec assez de soin, et il arrive souvent qu'elle forme alors une sorte de piston qui, étant lancé par la force élastique de l'eau à la glace qui est au-dessous, s'en va quelquefois jusque dans la machine pneumatique. Il ne faut pas seulement éviter cette cause d'erreur, il faut même veiller avec le plus grand soin à ce qu'aucune parcelle de liquide ne soit lancée, par le bouillonnement, contre les parois du tube, au-dessus du niveau de l'eau du bain. On y parvient en mettant une sorte de tampon lâche de fils fins de platine dans le liquide, et un autre tampon pareil un peu au-dessus de sa surface, mais au-dessous du niveau du bain. »

269. M. Regnault a publié un grand travail dont le principal objet est la détermination des forces élastiques et des chaleurs latentes de la vapeur d'eau, depuis les plus basses températures jusqu'aux températures voisines de 200°. Pour les forces élastiques, la concordance presque parfaite de ses résultats avec les résultats anciens de MM. Dulong et Arago justifie la confiance unanime dont ceux-ci avaient été l'objet. Pour les chaleurs latentes, les expériences de M. Regnault ne sont pas moins neuves par la disposition des appareils et les méthodes d'observation que par les masses considérables sur lesquelles il a opéré.

J'ai essayé de donner une idée de son appareil dans les figures 2, 3 et 4 (Pl. 47). La figure 4 représente l'ensemble; la figure 2, une première coupe verticale des deux calorimètres; et la figure 3, une seconde coupe verticale perpendiculaire à la première, et passant par le robinet distributeur.

La figure 4 fait voir les six parties principales de l'appareil, savoir :

1° *a*, fourneau et chaudière;

2° *b*, grand réservoir d'air comprimé, destiné à faire pression sur le liquide de la chaudière, pour retarder l'ébullition et la porter jusqu'à 200°;

3° *c*, manomètre donnant l'élasticité de l'air qui presse sur le liquide de la chaudière, et par conséquent la tension de la vapeur quand l'ébullition a lieu;

4° *d*, *d'*, le système des deux calorimètres;

5° *e*, condenseur établi dans une bache d'eau froide, servant d'une part à transmettre à la chaudière la pression du réservoir à air, et de l'autre à recevoir, pour la condenser, la vapeur qui

Digitized by Google

a servi à échauffer les tubes de communication jusqu'à l'entrée des calorimètres;

6° *f*, raccord à cinq tubes, 1, 2, 3, 4, 4'; par le tube 1, il reçoit la pression du réservoir à air; par le tube 2, il la transmet au manomètre; par le tube 3, au condenseur d'abord, et ensuite par 3' au condenseur de la chaudière, par les tubes 4 et 4', aux calorimètres *d* et *d'*.

Il est inutile d'entrer ici dans tous les détails de construction; il suffira de dire que la chaudière est de tôle de fer de 12 millimètres d'épaisseur, qu'elle contient 300 litres, et qu'elle reçoit seulement 150 litres d'eau; que le réservoir à air est fait de tôle pareille, qu'il contient 600 litres, et qu'une pompe à air toujours prête y maintient la pression voulue; que le condenseur contient 60 litres, qu'il porte un tube de niveau *e'* pour observer la marche de la distillation, et que l'eau se renouvelle sans cesse autour de lui par le tube à siphon 6.

Mais nous avons à examiner particulièrement la disposition des calorimètres *d* et *d'*, qui se voit en détail dans la figure 2. La vapeur y arrive par le robinet distributeur *g*; elle entre dans le premier globe *h*, passe dans le second *i*, et de là au serpentin *k*, qui se termine par sa communication avec le tube à air 4, venant du raccord *f*; un tube partant du second globe et descendant hors du calorimètre porte l'eau de condensation dans un ballon de verre *l* (Fig. 2 et 4). Cet appareil condenseur est enveloppé d'une masse d'eau sans cesse agitée, dont de bons thermomètres indiquent la température; connaissant le poids de l'eau et de toutes les pièces du calorimètre, le poids de la vapeur condensée, et l'élévation de température produite, on calcule par les méthodes indiquées plus haut, et en faisant toutes les corrections, la quantité de chaleur abandonnée par 1 kilogramme de vapeur dans les conditions de l'expérience.

La masse d'eau des calorimètres est de 66 kilogrammes; elle se détermine au moyen de la jauge *j*, qui est munie d'un entonnoir, et qui reçoit elle-même l'eau d'un réservoir supérieur. A chaque expérience, on vide les calorimètres par leur robinet inférieur. Pour les remplir, il suffit de tourner le robinet inférieur de la jauge et celui du tube par lequel elle communique au calorimètre.

Le robinet distributeur *g* reçoit la vapeur de la chaudière par un tube de communication qui, pour ne prendre que de la vapeur

sèche, s'ouvre au sein de la masse de vapeur, après avoir fait plusieurs circonvolutions intérieures. Au sortir de la chaudière, ce tube *m* est lui-même enveloppé d'un tube plus large *m'* qui le suit jusqu'au moment où il arrive au robinet distributeur (Fig. 3), Pour mieux assurer la circulation de la vapeur dans ce tube *m'*. on y adapte, près de son extrémité supérieure, un tube latéral *n'* (Fig. 3), qui va communiquer au tube 3' du condenseur (Fig. 4); c'est même par là, comme nous l'avons dit, que la pression de l'air se communique dans l'intérieur de la chaudière; en même temps le tube 3' est celui qui amène la vapeur au condenseur *e*. Cependant le tube *m'* ne verse d'abord la vapeur que dans la chambre annulaire du robinet régulateur pour en réchauffer toutes les pièces; puis de là, tant que le robinet n'est pas ouvert, elle passe dans le tube *n* (Fig. 3), qui la ramène encore au tube 3', comme celle qui provient du tube *n'*. Mais quand tout a été réchauffé, et que le moment est arrivé de procéder à l'expérience, on ferme le robinet qui termine le tube *n'* près de sa jonction avec le tube 3', puis l'on ouvre enfin le robinet distributeur lui-même pour donner la vapeur à l'un des calorimètres. Cette expérience terminée, on tourne le robinet distributeur d'une demi-circonférence, pour le mettre en communication avec l'autre calorimètre; et l'on répète alternativement les expériences pour prendre la moyenne des résultats.

Le même appareil a servi à M. Regnault pour les pressions moindres que pour la pression atmosphérique.

Voici le tableau des résultats auxquels il est parvenu :

TEMPÉRATURES.	CHALEURS LATENTES.	TEMPÉRATURES.	CHALEURS LATENTES.
0	607	120	522
10	600	130	515
20	593	140	508
30	586	150	501
40	579	160	494
50	572	170	486
60	565	180	479
70	558	190	472
80	551	200	464
90	544	210	457
100	537	220	449
110	529	230	442

Ces chaleurs latentes sont corrigées des augmentations de capacité que prend l'eau liquide à mesure que la température s'élève : mais les augmentations sont si petites que l'on peut les négliger sans erreur sensible, et qu'il suffit en conséquence d'ajouter à chaque chaleur latente la température correspondante, pour avoir, d'après M. Regnault, la quantité totale de chaleur que possède à cette température 1 kilogramme de vapeur d'eau à l'état de saturation.

Ces résultats, que je ne connaissais pas quand j'ai fait les recherches dont je viens de parler (**268**), s'accordent assez bien avec les nombres qui se déduisent de mes expériences; seulement, pour compléter les données qui entrent dans mes formules, il serait nécessaire que la chaleur spécifique des vapeurs, et celle de la vapeur d'eau en particulier, fussent déterminées avec plus de précision.

270. Chaleurs latentes de diverses vapeurs. — MM. Favre et Silbermann ont déterminé les chaleurs latentes de diverses vapeurs avec un appareil simple, et qui me paraît susceptible d'une assez grande exactitude lorsqu'il est mis en œuvre par des mains habiles. Il est représenté (Pl. 47, Fig. 5) : c'est un thermomètre à moufle, mais un thermomètre dont le réservoir contient 8 à 10 kilogrammes de mercure. *a*, ballon de verre, portant une moufle *b*, un piston plongeur *c* et un tube indicateur horizontal *df*, déterminé par un réservoir *g*. Le ballon est dans une caisse de bois, il repose sur un socle de liége et se trouve de toutes parts entouré d'édredon ou de peau de cygne.

La moufle est un tube de cuivre, sur lequel on a fait déposer de l'oxyde de plomb, pour le rendre inattaquable au mercure; elle est lutée à l'orifice à la glu marine, et butée à son extrémité avec un tube de verre *t*; le tube indicateur est ajusté aussi à la glu marine; quant au piston plongeur, il passe par une boîte à étoupe bien faite, et se règle au moyen de la vis *v*.

Cet appareil se gradue par des quantités de chaleur et non par des différences de température; pour cela on jette dans la moufle, par exemple, 10 grammes d'eau bouillante, dont on observe la température avec soin quand l'équilibre est établi : on sait alors combien l'appareil a reçu de calories, et par conséquent quelle est la longueur du tube indicateur qui correspond à une calorie. Quand cette longueur est de 2 ou 3 dixièmes de millimètre, la sensibilité est suffisante.

Digitized by Google

La figure 5 représente l'appareil disposé pour la recherche des chaleurs latentes. Le liquide à éprouver est dans la pipette *p* : lorsqu'il est en ébullition, le bec de la pipette s'engage dans l'extrémité d'un tube mince de verre qui est lui-même dans la moufle, et qui s'y trouve entouré de mercure ; la vapeur se condense dans ce tube, et la chaleur qu'elle abandonne s'observe sur le tube indicateur ; puis le tube de verre est tiré de la moufle pour être pesé, afin de connaître le poids de vapeur condensée.

Lorsqu'on veut appliquer l'appareil à la recherche des chaleurs spécifiques des liquides, très-près du point d'ébullition, il suffit de renverser la pipette en *p'* comme l'indique la figure 5 ; alors le liquide lui-même tombe dans la moufle, et le tube indicateur fait connaître le nombre des calories données à l'appareil.

Voici les résultats obtenus par MM. Favre et Silbermann :

› MS DES SUBSTANCES.	TEMPÉRATURE d'ébullition.	CHALEURS spécifiques.	CHALEURS latentes.
Eau	100°	1	536
Carbure d'hydrogène	200	0,49	60
Id.	250	0,50	60
Esprit de bois	66,5	0,67	264
Alcool absolu	78	0,64	208
Alcool valérique	»	0,59	121
Alcbol éthalique	»	0,51	58
Éther sulfurique	38	0,50	91
Éther valérique	113,5	0,52	69
Acide formique	100	0,65	169
Acide acétique	120	0,51	102
Acide butyrique	164	0,41	115
Acide valérique	175	0,48	104
Éther acétique	74	0,48	106
Butyrate de méthylène	93	0,49	87
Essence de térébenthine	156	0,47	69
Térébène	156	0,52	67
Essence de citron	165	0,50	70

271. Chaleur des combinaisons. — Toute combinaison chimique dégage de la chaleur ou du froid. Cette vérité générale est établie sur l'ensemble des faits que la chimie a pu recueillir soit dans la nature inorganique, soit dans le développement de la végétation, soit dans l'accroissement des corps vivants, et dans le renouvellement continuel de leur substance pondérable. Toutes les quantités de chaleur dégagées ou absorbées, tantôt par l'intime union des éléments matériels, tantôt par leur ségré-

Digitized by Google

gation, peuvent être comparées et mesurées comme les chaleurs spécifiques ou les chaleurs latentes.

Nous allons indiquer successivement les travaux qui ont été faits sur ce sujet par Lavoisier et Laplace, Rumford et M. Despretz ; par Dulong, dans un mémoire posthume, et enfin par MM. Favre et Silbermann ; puis par MM. Hess, Andrews et Graham, sur les combinaisons par voie humide.

Lavoisier et Laplace s'étaient servis du calorimètre de glace : Rumford employait un appareil plus simple, qui, pour certaines substances, peut donner des résultats satisfaisants, lorsqu'on a soin de faire toutes les corrections. Cet appareil est représenté (Pl. 46, Fig. 23) ; il ne diffère que par sa forme de celui qui sert à déterminer les chaleurs latentes des vapeurs ; le mode d'expérience est exactement le même. Dans le calorimètre de Rumford, le serpentin est horizontal, afin que les produits de la combustion ne s'échappent pas trop vite, et l'entrée a du serpentin est munie d'une espèce d'entonnoir où se place le corps soumis à la combustion. Si c'est l'huile ou l'alcool, les expériences sont très-faciles ; on les met dans une petite lampe que l'on pèse au commencement de l'expérience et à la fin, pour savoir le poids du corps qui a brûlé ; la flamme et les produits de la combustion parcourent les plis du serpentin ; on néglige la chaleur qu'ils conservent en sortant, et l'on prend pour chaleur dégagée la chaleur $2rm$, m étant la masse d'eau corrigée du calorimètre, et $2r$ l'élévation de température qu'il reçoit en partant de r^0 au-dessous de la température ambiante pour s'élever de r^0 au-dessus.

Le tableau suivant contient les résultats obtenus par Rumford (R) ; par Lavoisier et Laplace (LL), et par M. Despretz (D) ; ceux-ci résultent d'une méthode analogue à celle de Rumford :

Tableau des quantités de chaleur dégagées par la combustion de diverses substances.

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	ÉLÉVATION DE TEMPÉRATURE que 1 gr. de chaque substance, en se brûlant avec l'oxygène, communiquerait à 1 gr. d'eau.	ÉLÉVATION DE TEMPÉRATURE que 1 gr. d'oxygène, en brûlant chaque substance, communiquerait à 1 gr. d'eau.
Fer	» D.	5325
Hydrogène	23400° LL.	2910
Id.	» D.	2578
Huile d'olive	11166 LL.	3696
Id.	9044 R.	2993
Cire blanche	10500 LL.	3355
Id.	9479 R.	3029
Huile de colza épurée	9307 R.	»
Suif	8369 R.	»
Id.	7186 LL.	»
Éther sulfurique	8030 R.	3136
Phosphore	7500 LL.	5885
Charbon	7226 LL.	2722
Id.	» D.	2967
Naphte	7838 R.	»
Alcool à 42° Baumé	6195 R.	3019
Id. plus aqueux	5422 R.	»
Id. à 33°	5261 R.	»
Bois très-sec	4314 R.	3093

272. Résultats de Dulong. — Dulong a été enlevé à la science avant qu'il eût terminé son grand travail sur la chaleur dégagée dans la combustion des différents corps. Heureusement on a pu recueillir les principaux résultats auxquels il était déjà parvenu, et, grâce aux indications de M. Cabart, qui l'avait secondé dans ses expériences, l'on peut du moins se faire une idée de la méthode à laquelle il avait donné la préférence. (*Ann de Chim. et de Phys.*, 1843, t. VIII.)

Le calorimètre de Dulong est représenté dans la figure 8 de la planche 47 ; il se compose d'une grande caisse rectangulaire *xy* de 11 litres de capacité, destinée à être remplie d'eau, et de l'appareil de combustion proprement dit, que cette eau enveloppe de toutes parts. L'appareil de combustion est une chambre prismatique rectangulaire *a*, de cuivre rouge mince, de 25 centimètres de hauteur, dont la base a 10 centimètres de longueur sur 7c,5 de largeur ; elle est munie d'appendices convenables

pour introduire les éléments qui se doivent brûler, et pour faire sortir les produits de la combustion, quand ils sont volatils.

L'oxygène arrive, suivant les besoins, par deux tubes, l'un vertical *g*, qui se termine en haut par une douille conique, pour les ajustements, et qui s'aplatit pour entrer dans le prisme un peu au-dessus de sa base ; l'autre *d*, qui s'ouvre au milieu de la base elle-même.

Les corps combustibles gazeux arrivent par le bec *b*, qui varie suivant la combustibilité du gaz.

Les corps combustibles liquides sont contenus dans un tube de verre fermé par un bout : quelques brins de coton plongent dans le liquide.

On ne sait pas comment se faisait l'inflammation des gaz et des liquides.

Les corps combustibles solides se disposent diversement : le fer est roulé en spire ; les autres métaux sont contenus à l'état pulvérulent dans une capsule de cuivre ou de platine ; on les mélange avec une matière inerte quand on redoute l'agglutination. Ils sont enflammés avec un morceau d'amadou.

Le charbon, ne prenant pas feu de cette manière, est taillé en cône ; la pointe du cône s'allume dans une flamme d'alcool, et se porte rapidement dans la chambre de combustion.

Une fenêtre latérale *f*, fermée avec une lame de verre, permet de voir ce qui se passe dans l'appareil pendant les expériences.

Pendant la combustion, les gaz se dégagent par le serpentin *s* qui part du fond, se replie sept ou huit fois sur lui-même avec une petite inclinaison, redescend verticalement, remonte de même, et se termine par un évasement propre à recevoir un thermomètre *t'*. Les gaz, après avoir donné leur température, s'échappent par le tube latéral *p* pour se rendre dans un gazomètre de dégagement.

La chambre de combustion se termine en haut par une rigole annulaire où l'on met du mercure. Les bords du couvercle plongent dans le mercure, pour faire fermeture hydraulique.

Deux thermomètres *t*, symétriquement placés, donnent la température de l'appareil.

Un agitateur dont la tige est en *k* sert à mêler toute la masse d'eau pour avoir une température uniforme.

Dulong paraît avoir adopté la méthode de Rumford dans ses observations.

Digitized by Google

Le tableau suivant contient les résultats de ses expériences.

Tableau des quantités de chaleur dégagées par la combustion, d'après Dulong.

SUBSTANCES.	CHALEUR PRODUITE PAR			
	1 litre.	1 gr. de combust.	1 litre d'oxygène.	1 gr. d'oxygène.
Hydrogène	3106*	34601	6212	4325
Gaz des marais	9587*	13350	4793	3337
Oxyde de carbone	3130*	2490	6260	4358
Gaz oléfiant	15338*	12203	5113	3560
Alcool absolu	14375*	6962	4792	3336
Charbon	3929*	7295	3929	2735
Essence de térébenthine	70607*	11567	5043	3511
Essence de térébenthine	66145	10836*	4710	3279
Éther sulfurique	33353	10042	5770	3878
Éther sulfurique	31335	9431*	5256	3659
Cyanogène	12270*	5244	6135	4271
Huile d'olive	»	9862*	»	»
Soufre	»	2601*	»	2600
Fer	»	»	6216*	4327
Étain	»	»	6508*	4531
Protoxyde d'étain	»	»	6477*	4509
Cuivre	»	»	3722*	2594
Protoxyde de cuivre	»	»	3130*	2179
Antimoine	»	»	5484*	3818
Zinc	»	»	7577	5275
Cobalt	»	»	5721	3983
Nickel	»	»	5323*	3706

Pour chaque substance, le nombre marqué d'un astérisque * est la moyenne des résultats donnés par Dulong. Ce nombre correspond tantôt à 1 litre, tantôt à 1 gramme de combustible, et pour les métaux il correspond à 1 litre d'oxygène combiné avec le métal. Pour le charbon, l'alcool, l'éther et l'essence, la donnée de 1 litre de vapeur ne résulte pas directement de l'expérience : elle a été obtenue par un calcul dont Dulong n'a pas donné les éléments.

Charbon. — Dulong dit que 1 litre de vapeur donne 7858. Il est certain, comme M. Ebelmen l'a fait remarquer (*Comptes rendus*, t. IV, p. 346), que ce litre de vapeur correspond à 2 litres d'acide carbonique, et par conséquent à un poids d'environ 1 gramme. De cette manière, la vapeur de carbone aurait une densité double de celle qui est généralement adoptée par les chimistes. C'est pourquoi j'ai pris seulement 3929 pour la chaleur produite par 1 litre de vapeur de carbone, admettant

Digitized by Google

ainsi qu'il y a 1 litre de vapeur dans 1 litre d'acide carbonique, et que la densité de cette vapeur résulte de cette donnée. De plus, d'après les expériences de M. Dumas (*Ann. de Chim. et de Phys.*, 1841, t. I), j'ai adopté 75 pour l'équivalent du charbon, et par suite 0,4146 pour la densité de sa vapeur, par rapport à l'air, et 0^{gr},5386 pour le poids de 1 litre à 0 sous la pression de 760; ce qui donne 7295 pour la chaleur produite par 1 gramme.

Alcool absolu. — En adoptant avec MM. Boussingault et Dumas, 1,1057 pour densité de l'oxygène, et 0,0691 pour celle de l'hydrogène, la densité de la vapeur d'eau est 0,6219; celle du bicarbure d'hydrogène est 0,9674, et celle de la vapeur d'alcool 1,5893; aussi 1 litre pèse 2^{gr},0646. D'où il résulte 6962 pour la chaleur dégagée par 1 gramme d'alcool.

Essence de térébenthine. — Avec les données précédentes, la densité de la vapeur d'essence composée de 10 volumes de carbone et 8 d'hydrogène, est 4,6988; 1 litre pèse donc 6^{gr},1042; d'où il résulte 11567 pour la chaleur donnée par 1 gramme. Mais, pour leur combustion, les 10 litres de carbone exigent 10 litres d'oxygène; les 8 litres d'hydrogène en exigent 4; ce sont donc ces 14 litres d'oxygène qui produisent les 70607 unités données par Dulong; ce qui donne pour 1 litre d'oxygène 5043, et pour 1 gramme le nombre 3511 de la dernière colonne. Remarquons toutefois que Dulong, en même temps qu'il donne 70607 pour un litre de vapeur d'essence, donne aussi 10836 pour 1 gramme de vapeur. En partant de cette seconde donnée, on trouve les nombres inscrits dans la seconde ligne relative à l'essence. Le désaccord entre ces résultats tient sans doute à ce que Dulong avait adopté dans ses calculs une autre densité. Comme il est présumable que l'expérience a été faite en poids, on peut regarder le nombre 10836 relatif à 1 gramme, comme étant une donnée plus directe que le nombre 70607 relatif à 1 litre.

Éther sulfurique. — Les observations qui précèdent s'appliquent exactement à l'éther, que Dulong a aussi donné sous deux formes, savoir : 33353 pour 1 litre, et 9431 pour 1 gramme. Le premier nombre donne 5570 pour 1 litre d'oxygène, le deuxième donne 5256; c'est une différence d'environ $\frac{1}{20}$.

Métaux. — Je n'ai pas calculé les quantités de chaleur données par 1 litre de vapeur métallique, car il aurait fallu pour cela discuter les vrais poids des atomes, et les hypothèses les plus plausibles sur le volume de vapeur qui se combine avec

Digitized by Google

1 litre d'oxygène ; il m'a semblé même peu utile de calculer les quantités de chaleur données par 1 gramme des différents métaux, car il faudrait pour cela être sûr du produit qui a été formé pendant la combustion, et Dulong ne l'a indiqué que pour l'antimoine, qui paraît avoir donné seulement de l'acide antimonieux. On sent combien il importe, dans les recherches de cette nature, de connaître très-exactement les produits qui ont été formés. C'est pour cela que je rapporterai encore les observations suivantes, qui sont surtout précieuses, parce qu'elles ont été faites par Dulong.

Remarques diverses. — « L'oxyde de carbone brûle mal avec l'oxygène : il a dû être mélangé avec moitié de son volume d'hydrogène. »

« Dans la combustion du cyanogène, il se forme une petite quantité d'acide nitreux, et dans celle du soufre un peu d'acide sulfurique anhydre. »

« Dans la combustion du protoxyde d'étain, il paraît s'être formé une combinaison entre le protoxyde et le peroxyde. »

« En faisant brûler 1 litre d'hydrogène avec de l'oxyde d'azote, on a eu production de 5220 unités de chaleur ; 1 litre d'oxyde de carbone avec l'oxyde d'azote a donné 5549 ; dans les deux expériences, il s'est produit de l'acide nitreux en quantité très-sensible. »

Malgré l'observation importante de Dulong, sur la formation de l'acide nitreux, ces deux résultats semblent difficiles à expliquer, car tout annonce que l'oxygène ne peut pas se séparer de l'azote du protoxyde d'azote, sans qu'il y ait absorption de chaleur. Ainsi, s'il n'y avait pas en même temps une suroxygénation de l'azote, le litre d'hydrogène donnerait bien moins de 3000 unités de chaleur ; il faut donc que la suroxygénation de l'azote en produise presque autant, pour arriver au nombre observé 5220.

Combustion des corps composés. — Le tableau suivant contient les quantités de chaleur que les gaz ou vapeurs composés devraient dégager si les éléments qui les constituent se comportaient à l'égard de l'oxygène comme des éléments isolés et libres.

Digitized by Google

		Chaleur que donneraient les éléments.	Chaleur donnée par l'expérience.	Différence.
Gaz des marais.........	CH^2.........	10241	9587	— 654
Gaz oléfiant............	C^2H^2.........	14070	15338	+ 1268
Alcool absolu.	$C^2H^2 + HO^{\frac{1}{2}}$. .	14070	14375	+ 375
Essence de térébenthine..	$C^{10}H^8$........	64138	66145	+ 2007
Ether..................	$2C^2H^2 + HO^{\frac{1}{2}}$.	28140	31335	+ 3195
Cyanogène.............	C^2Az........	7858	12270	+ 4412

On aurait pu s'attendre à voir les quantités de chaleur données par les composés, toujours moindres que celles des éléments, car s'il se dégage de la chaleur lorsque le carbone se combine avec l'hydrogène ou avec l'azote, il devrait y avoir de la chaleur absorbée lorsque ces éléments se séparent pour se porter sur l'oxygène. C'est le contraire que l'on observe : les composés donnent presque toujours plus de chaleur que les éléments; ces excès sont surtout considérables pour l'essence, l'éther et le cyanogène; ici, la formation de l'acide nitreux y contribue sans doute; peut-être dans les autres combustions y a-t-il aussi des produits analogues ;. c'est un point qu'il importerait de bien établir.

Oxyde de carbone. — Lorsqu'un corps est susceptible de se combiner avec plusieurs équivalents ou plusieurs atomes d'oxygène, on peut concevoir que le phénomène s'accomplisse de deux manières ; ou que le corps arrive immédiatement au maximum d'oxygénation, ou qu'il y arrive successivement, en prenant d'abord le premier atome pour former un premier composé, puis le deuxième atome, puis le troisième, etc. Dans les deux cas, le composé définitif étant identique à lui-même, il en résulte que la somme des quantités de chaleur dégagées dans le second mode, doit être égale à la quantité de chaleur dégagée dans le premier; du moins, si l'on tient compte de toutes les circonstances, et surtout des états divers dans lesquels se trouvent ou les éléments, ou les composés successifs. Mais il se présente ici une question importante : c'est la question de savoir si l'union des divers atomes est accompagnée des mêmes dégagements de chaleur. Malheureusement il y a peu de combinaisons sur lesquelles on puisse faire des recherches de cette nature; mais le carbone est du nombre, et les résultats qu'il présente sont remarquables : en effet, 1 litre de vapeur, en se combinant pour donner de l'acide corbonique, donne 3929 unités de

Digitized by Google

chaleur; 1 litre de vapeur de carbone pris à l'état d'oxyde de carbone, dans 1 litre de cet oxyde, donne aussi par sa combustion 1 litre d'acide carbonique; mais il dégage 3130 unités de chaleur; la différence 3929 — 3130 est de 799; donc le litre de vapeur de carbone en se combinant avec $\frac{1}{2}$ litre d'oxygène, pour former 1 litre d'oxyde de carbone, n'a dû développer que 799 unités de chaleur. C'est-à-dire que l'union du premier atome a donné 799 unités, et celle du second 3130, presque quatre fois plus. Réciproquement, quand 1 litre d'acide carbonique retombe à l'état d'oxyde de carbone en se combinant avec 1 litre de vapeur de carbone pour former deux litres d'oxyde, il absorbe 2331 unités de chaleur, et l'on perd les $\frac{4}{5}$ du combustible. Car on a pour résultats 2 litres d'oxyde de carbone qui n'ont dû dégager chacun que 799 unités ou en somme 1598, tandis que l'on aurait eu 2 litres d'acide carbonique qui auraient donné 7858; perte 6260; à moins que l'on ne reproduise cette chaleur en faisant brûler l'oxyde de carbone. Mais il n'y a aucune donnée pour déduire de là les différences de température que l'on peut obtenir dans deux foyers, avec la même dépense d'air, en produisant dans l'un de l'acide carbonique, et dans l'autre de l'oxyde de carbone.

273. Résultats de MM. Favre et Silbermann. — En comparant les résultats de Dulong sur la combustion de l'hydrogène à ceux qui avaient été précédemment obtenus par Lavoisier et Laplace et par M. Despretz, on est frappé de la différence considérable qu'ils présentent. M. Despretz trouve 20624, Lavoisier et Laplace 23400, et Dulong 34601. Il était fort désirable que tous les doutes fussent levés à cet égard, c'est ce qui a déterminé MM. Favre et Silbermann à reprendre ce sujet, et à procéder avec toutes les précautions possibles, soit pour la pureté des gaz, soit pour l'exacte détermination des températures. Six expériences, faites chacune sur un produit de 3 grammes d'eau, leur ont donné pour résultat moyen 34462, nombre presque identique à celui de Dulong; ainsi, l'on ne peut pas douter que les déterminations antérieures ne soient trop faibles de moitié de leur valeur.

Après avoir obtenu ce premier résultat, MM. Favre et Silbermann, par d'ingénieux procédés et avec un zèle infatigable, ont entrepris de résoudre d'une manière générale l'important problème des quantités de chaleur dégagées par les combustions

Digitized by Google

diverses ; la solution qu'ils en donnent peut être regardée comme complète, tant ils ont pris le soin de l'étendre aux corps les plus divers et les plus difficiles à obtenir chimiquement à l'état de pureté. Voici le tableau des résultats auxquels ils sont parvenus :

NOMS DES SUBSTANCES.	FORMULES.	QUANTITÉ DE CHALEUR donnée par 1 gr. DE COMBUSTIBLE.
Hydrogène à 15°	....	34 462,0
Charbon, de C à CO^2	....	8 080,4
Id. de sucre, de C à CO^2	....	8 039,8
Id. des cornues à gaz		8 047,3
Graphite naturel, n° 1	....	7 811,5
Id. des hauts fourneaux, n° 1	....	7 785,3
Id. naturel, n° 2	....	7 781,5
Diamant		7 770,1
Graphite des hauts fourneaux, n° 2	....	7 737,1
Diamant chauffé		7 878,7
Oxyde de carbone à CO^2	....	2 402,7
Gaz des marais	C^2H^4	13 063,0
Gaz oléfiant	C^4H^4	11 857,8
Paramylène	$C^{10}H^{10}$	11 491,0
Amylène	$C^{20}H^{20}$	11 303,5
Id.	$C^{22}H^{22}$	11 206,0
Cétène	$C^{32}H^{32}$	11 078,5
Metamylène	$C^{40}H^{40}$	10 928,5
Éther sulfurique	$HO^2 + C^8H^8$	9 027,»
Id. valérique	$HO^2 + C^{20}H^{20}$	10 488,»
Esprit de bois	$HO^2 + C^2H^2$	5 301,5
Alcool de vin	$HO^2 + C^4H^4$	7 184,0
Alcool valérique	$HO^2 + C^{10}H^{10}$	8 958,6
Alcool éthalique	$HO^2 + C^{32}H^{32}$	10 629,2
Acétone	$C^6H^6 + O^2$	7 303,0
Aldéhyde éthalique	$C^{32}H^{32}O^2$	10 342,2
Aldéhyde stéarique	$C^{36}H^{36}O^2$	10 496,0
Formiate de méthylène	$C^4H^4O^4$	4 197,4
Acétate de méthylène	$C^6H^6O^4$	5 342,0
Formiate d'alcool	$C^6H^6O^4$	5 279,0
Éther acétique	$C^8H^8O^4$	6 292,7
Butyrate de méthylène	$C^{10}H^{10}O^4$	6 798,5
Éther butyrique	$C^{12}H^{12}O^4$	7 090,9
Valérate de méthylène	$C^{12}H^{12}O^4$	7 375,6
Id. d'alcool	$C^{14}H^{14}O^4$	7 834,9
Acétate d'alcool valérique	$C^{20}H^{20}O^4$	7 971,2
Éther valéramilique	$C^{20}H^{20}O^4$	8 543,6
Acide formique	$O^4 + C^2H^2$	2 000,0
Id. acétique	$O^4 + C^4H^4$	3 505,2
Id. butyrique	$O^4 + C^8H^8$	5 623
Id. valérique	$O^4 + C^{10}H^{10}$	6 439
Id. éthalique	$O^4 + C^{32}H^{32}$	9 420
Id. stéarique	$O^4 + C^{36}H^{36}$	9 820
Id. phrénique	$C^{12}H^6O^2$	7 812,3
Térébène	$C^{20}H^{16}$	10 063
Essence de térébenthine	$C^{20}H^{16}$	10 852
Id. de citron	$C^{20}H^{16}$	10 959,0

NOMS DES SUBSTANCES.	FORMULES.	QUANTITÉ DE CHALEUR donnée par 1 gr. DE COMBUSTIBLE.
Soufre natif ou fondu........	....	2 221,1
Id. cristallisé à l'instant..	....	2 258,4
Sulfure de carbone	....	3 400,5
Charbon brûlant dans le peroxyde d'azote à 10°..........................	....	11 157,9
Décomposition du peroxyde d'azote	....	11 090,5
Id. de l'eau oxyg, 1 gr. oxyg...... .	....	1 303,0
Décomposition de l'oxyde d'argent, absorbe		— 22,1
Spath d'Islande en CO^2, et C a O, absorbe		— 308,1
Arragonite { 1° se combine, donne..................		+ 38,3
Arragonite { 2° se désagrége, absorbe..................		— 308,1
Id. désagrégé après combinaison, absorbe..................		— 269,8

Disposition de l'appareil de MM. Favre et Silbermann. — Cet appareil est représenté dans les figures 9, 10, 11 et 12 (Pl. 47). (Fig. 12), vue d'ensemble et disposition générale; (Fig. 10), calorimètre; (Fig. 11), couvercle du calorimètre; (Fig. 9), chambre de combustion et tous les accessoires qui s'y rapportent.

Chambre à combustion. — Elle se compose d'un vase de cuivre très-mince *a*, qui a trois ouvertures *b*, *c*, *d* : la première servant en général à l'arrivée de l'oxygène; la seconde à l'introduction du corps combustible, et la dernière à l'issue des produits de la combustion. Ceux-ci, au sortir de la chambre, pénètrent dans le serpentin *s* par la branche *t*, en parcourent tous les plis, s'élèvent par la branche *t'* et de là se rendent, par un long tube, dans le tube à potasse *p* (Fig. 12), qui absorbe l'acide carbonique, dans le tube *p'* de ponce qui absorbe l'eau, dans le tube *p''*, mi-partie de ponce et de potasse, qui est comme *témoin* pour empêcher au besoin les retours d'acide carbonique, et de là enfin dans un tube de verre chauffé, contenant de l'oxyde de cuivre, pour faire passer à l'état d'acide carbonique les portions d'oxyde de carbone qui peuvent se former, et qui se forment en effet dans la plupart des combustions. Cet acide carbonique est reçu à son tour dans un tube de potasse, que l'on pèse soigneu-

Digitized by Google

sement comme les précédents pour faire une analyse complète des produits gazeux auxquels la combustion donne naissance.

Les corps combustibles s'introduisent par l'ouverture *c*, qui est une espèce de douille un peu conique, recevant une virole rodée et épaisse *f* portant deux pas de vis, l'un supérieur qui reçoit le bouchon f', formant clôture hermétique, l'autre inférieur recevant les viroles f'', formant support des divers combustibles; à ces viroles sont en effet successivement attachées, 1° la cartouche *g* en feuille de platine, dans laquelle on met les charbons de différentes espèces; 2° la petite lampe *h* où se placent les divers combustibles, éthers, alcools, huiles essentielles, etc.; 3° la capsule de cuivre où se placent la plupart des corps solides; 4° enfin la capsule de porcelaine où se place le soufre. La petite lampe et les capsules sont attachées à la virole par deux fils de platine représentés sur la figure.

Le bouchon f' porte un tube droit servant de fenêtre pour voir l'intérieur; à cet effet, il est fermé en bas par une triple plaque d'alun, de quartz et de verre, et en haut il reçoit un miroir représenté de profil en *m* et de face en m'; il reçoit en outre un tube un peu oblique, destiné tantôt à l'introduction de l'hydrogène, tantôt à celle de l'oxygène, suivant l'espèce de combustion que l'on veut faire. Par exemple, si l'on veut brûler du charbon, le tube qui arrive à l'ouverture *b* se ferme; la cartouche *g*, remplie de charbon en grains, se visse au moyen de sa virole f'' sur le bouchon *d*; on l'allume, et, après avoir mis rapidement toutes choses en place, on souffle de l'oxygène par le tube *l*; l'oxygène traverse le charbon de la cartouche, active et maintient la combustion, puis les produits gazeux s'échappent, comme nous l'avons dit, par l'ouverture *d*. Mais si l'on brûle, par exemple, un liquide, c'est la petite lampe qui se visse au bouchon *f* au moyen de sa virole f'', et alors le tube *l* est fermé avec le bouchon *o*, et c'est par le tube qui arrive à l'ouverture *b*, que l'on souffle l'oxygène.

Calorimètre. — Il se compose (Fig. 10) d'un vase de plaqué très-mince contenant environ 2 kilogrammes d'eau; c'est au milieu de ce bain de liquide que la chambre à combustion est comme suspendue par trois gros fils de cuivre auxquels elle est soudée, et qui, s'élevant plus haut que le niveau de l'eau, viennent par un cran qu'ils portent s'attacher au couvercle, comme on le voit en *q*, q', q'' (Fig. 11). Un bon thermomètre plonge dans le bain,

Digitized by

et sa tige s'élève par l'ouverture r''. Quant aux deux autres ouvertures r et r', elles servent à laisser passer les deux tiges de l'agitateur.

Le vase de plaqué est enveloppé de peau de cygne, comme on le voit (Fig. 10), et la peau de cygne est elle-même entourée d'un vase de cuivre à double enveloppe, contenant de l'eau. Toutes ces enveloppes me semblent superflues : on obtiendrait, à mon avis, plus d'exactitude, en mettant simplement le vase de plaqué à l'abri des courants d'air extérieur. Comme on ne peut pas l'empêcher de perdre de la chaleur, il faut seulement s'arranger pour qu'il fasse ces pertes avec une grande régularité, afin que la correction se fasse avec plus de certitude.

Ensemble de l'appareil. — Jetons maintenant un coup d'œil sur l'ensemble de l'appareil (Fig. 12). Ici le calorimètre tout monté est en a sur le pied solide b; deux vases de Mariotte c, c', par un écoulement uniforme, amènent l'eau dans les réservoirs d, d', remplis tous deux d'oxygène pour les combustions ordinaires, ou l'un d'oxygène et l'autre d'hydrogène lorsqu'il s'agit de brûler l'hydrogène; suivons seulement la marche du gaz qui vient du réservoir ou gazomètre d; il sort par le tube e, se lave dans le vase f, arrive de là dans les tubes horizontaux g, de 3 ou 4 mètres de longueur, contenant de la ponce et de l'acide sulfurique; au sortir de ces tubes, il pénètre enfin dans la chambre de combustion; un robinet sert à en régler l'admission.

Il importe de conduire l'opération avec ménagement; elle dure, par exemple, 4 ou 5' lorsqu'on opère sur 1 gramme ou 1 gramme $\frac{1}{2}$ de combustible; pendant ce temps-là on fait mouvoir l'agitateur, et, avec la lunette du cathétomètre k, l'on suit avec soin les mouvements du thermomètre, jusqu'à l'instant où il a atteint son maximum, et l'on note le temps correspondant à chaque division. Avec ces données et les autres éléments de l'expérience, on calcule aisément, d'après les méthodes que nous avons indiquées, les quantités de chaleur qui ont été produites.

274. Chaleur des combinaisons par voie humide. — MM. Hess, Andrews et Graham ont fait récemment des recherches très-étendues sur les quantités de chaleur dégagées dans quelques classes de combinaisons par voie humide (*Ann. de Chim. et de Phys.*, pour M. Hess, 1840, t. LXXIII; et 1842, t. IV; pour M. Andrews, 1842, t. IV; pour M. Graham, 1843, t. VIII). Nous rapporterons d'abord les résultats de M. Graham.

I. *Chaleur dégagée par l'hydratation de l'acide sulfurique.*

Composition de l'acide employé.	Élévation de température.	Différence.
H^2O,SO^3	3°,86 R.	
Id. + H^2O	2 ,39	1°,47
Id. + $2H^2O$	1 ,86	0 ,53
Id. + $3H^2O$	1 ,30	0 ,56
Id. + $4H^2O$	1 ,06	0 ,24
Id. + $5H^2O$	0 ,87	0 ,19
Id. + $7H^2O$	0 ,68	0 ,19

Le poids d'acide employé a toujours été $\frac{1}{20}$ d'équivalent. Dans toutes les expériences, l'équivalent du premier acide H^2O,SO^3 est $501,16 + 112,5 = 613,66$; en prenant le gramme pour unité, c'est $613^{gr},66$, dont le 20^e est $30^{gr},68$; le 20^e d'équivalent du deuxième est $36^{gr},3$; du troisième, $41^{gr},93$; du quatrième, $47^{gr},55$; du cinquième, $53^{gr},18$; du sixième, $58^{gr},8$, et du septième, $70^{gr},05$; ce qui correspond toujours au même poids d'acide anhydre, savoir un 20^e de 501,16 ou $25^{gr},06$. L'acide a toujours été versé dans 1000 grammes d'eau, contenus dans un creuset de platine de 1202 grammes; l'agitation avait lieu avec un tube creux de palladium pesant $207^{gr},6$, et le thermomètre qui indiquait les températures était petit, très-sensible et divisé en 80 parties. En réalité, M. Graham a employé le grain au lieu du gramme que j'indique ici; mais ce changement d'unité ne doit apporter aucun changement dans les résultats, si ce n'est peut-être qu'en opérant sur des masses plus grandes on aurait plus d'exactitude. Le creuset était enveloppé de coton, afin de négliger la petite perte de chaleur qui se pouvait faire pendant le mélange, dont la durée ne dépassait pas 1′ ou 2′. Cette correction, cependant, ne serait pas sans influence sur les résultats, puisqu'on y tient compte des 100^{mes} de degré.

Si l'on voulait déduire de ces expériences l'élévation de température qu'un équivalent d'acide produirait dans un équivalent d'eau, il faudrait prendre le poids p de l'appareil, en y comprenant l'eau et ses autres pièces, réduites en eau, le diviser par 112,5, pour avoir le nombre des équivalents réchauffés, le multiplier par 20, puisque l'on n'a opéré qu'avec un 20^e d'équivalent, et enfin multiplier ce dernier produit successivement par les diverses élévations de température observées; car dans les mélanges dont il s'agit, l'acide était tellement dilué après l'opé-

Digitized by Google

ration, qu'en y ajoutant de l'eau on ne pouvait obtenir une élévation sensible de température.

On pourrait bien en déduire aussi les nombres décroissants d'unités de chaleur qu'est capable de dégager 1 gramme d'acide anhydre, lorsqu'on le mêle à une masse connue d'eau, après l'avoir préalablement combiné avec 1 atome d'eau, avec 2, avec 3, etc.; bien entendu que la masse d'eau devrait être assez grande pour que l'acide dégageât toute la chaleur qu'il est capable de dégager.

Mais les données de l'expérience ne me semblent pas encore assez exactes pour que ces déterminations absolues soient suffisamment approchées.

Cependant elles permettent dès à présent de faire des comparaisons intéressantes. Ainsi, la première différence, $1^{\circ},47$, comprise dans la 3e colonne, fait voir qu'en prenant un nouvel atome d'eau, l'acide H^2O,SO^3 dont la densité est 1,848, produit une élévation de température plus petite de $1^{\circ},47$; donc la chaleur correspondante est celle qui a été dégagée par la combinaison de ce deuxième atome d'eau; de même la chaleur dégagée par la combinaison du troisième atome est représentée par 0,53; celle du quatrième l'est par 0,56, etc., c'est-à-dire que le premier atome d'eau qui se combine avec le protohydrate H^2O,SO^3 dégage autant de chaleur que les 4 atomes suivants; que le deuxième et le troisième en dégagent des quantités égales; que le quatrième en dégage la moitié seulement du troisième, etc.

On avait pensé que les quantités de chaleur dégagées par les atomes successifs avaient entre elles des rapports simples; les nombres trouvés par M. Graham ne paraissent pas favorables à cette opinion. Cependant, M. Graham a observé lui-même un phénomène dont il importerait de connaître l'influence; il a constaté qu'un acide qui vient d'être étendu, donne beaucoup moins de chaleur quand on le laisse reposer pendant quelques jours. Il faudrait savoir si le mélange qui se fait dans les 1000 grammes n'est pas lui-même dans ce cas, et si, quand on observe le thermomètre, il ne doit pas s'exercer encore une action lente où la chaleur joue un rôle, et un rôle inégal lorsqu'on a versé des acides diversement concentrés.

II. *Chaleur absorbée par la dissolution dans l'eau de quantités équivalentes de sels cristallisés* (en degrés Réaumur).

Sulfate de magnésie	$7H^2O$	0°,92 R.
Sulfate de zinc		1 ,00
Protosulfate de fer		1 ,06
Sulfate de cuivre	$5H^2O$	0 ,67
Sulfate de manganèse		0 ,12
Sulfate de manganèse et de potasse	$6H^2O$	2 ,30
Sulfate de magnésie et d'ammoniaque		2 ,24
Sulfate de manganèse et d'ammoniaque		2 ,24
Sulfate de fer et d'ammoniaque		2 ,27
Sulfate de fer et de potasse		2 ,47
Sulfate de zinc et de potasse		2 ,60
Sulfate de cuivre et d'ammoniaque		2 ,63
Sulfate de zinc et d'ammoniaque		2 ,73
Sulfate de cuivre et de potasse		3 ,04
Sulfate de soude	$10H^2O$	4 ,59
Sulfate de potasse	anhydre	1 ,51
Sulfate d'ammoniaque		0 ,51
Chromate de potasse		1 ,18
Bichromate de potasse		3 ,96
Nitrate de potasse		3 ,96
Terchromate de potasse		2 ,28
Biphosphate de potasse	$2H^2O$	2 ,24
Biarséniate de potasse		2 ,26
Sulfate d'eau et de potasse	anhydre	1 ,95

III. *Chaleur dégagée dans l'hydratation complète de sels anhydres.*

Sulfate de magnésie	5°,25 R.
Sulfate de zinc	5 ,17
Sulfate de cuivre	4 ,40
Sulfate de manganèse	3 ,34
Sulfate de magnésie et de potasse	3 ,90
Sulfate de zinc et de potasse	4 ,30
Sulfate de cuivre et de potasse	5 ,01

IV. *Chaleur dégagée par la combinaison du premier atome d'eau dans les sulfates magnésiens.*

Sulfate d'eau	1°,47 R.
Sulfate de cuivre	1 ,47
Sulfate de manganèse	1 ,43
Sulfate de magnésie	1 ,30
Sulfate de zinc	1 ,71

Digitized by Google

Les nombres contenus dans les trois tableaux précédents résultent d'expériences faites dans les conditions que nous avons indiquées en parlant du premier tableau. On a toujours employé un 20ᵉ d'équivalent de chacun des sels, pour le mélanger dans le même appareil avec la même masse d'eau de 1000 grammes.

Après avoir obtenu d'abord les nombres du deuxième tableau, M. Graham a préparé des sels anhydres, sur lesquels il a opéré, et, aux élévations de température qu'ils ont produites, il a ajouté un nombre égal au froid produit par la dissolution du même sel cristallisé; la somme est la chaleur d'hydratation contenue dans le troisième tableau.

Quant aux nombres du quatrième tableau, nous avons déjà vu, en parlant de l'acide sulfurique, comment le premier a été donné; les autres résultent d'expériences analogues, c'est-à-dire que M. Graham, après avoir agi sur les sels anhydres, a préparé les mêmes sels avec un atome d'eau, pour les soumettre à la même épreuve; alors, en retranchant la seconde élévation de température de la première, il a obtenu l'élévation de température correspondant à la chaleur dégagée par le premier atome d'eau.

Ces études relatives à l'hydratation et aux dissolutions sont en quelque sorte le point de départ indispensable pour arriver à une analyse calorifique complète des combinaisons par voie humide; mais il serait fort désirable que l'on y joignît en même temps l'étude des variations de densité qu'éprouvent les éléments.

M. Andrews a dirigé ses recherches vers un objet plus général et non moins important; il a examiné particulièrement les actions réciproques des acides et des bases, et ses expériences tendent à établir les lois suivantes, qui méritent toute l'attention des physiciens et des chimistes.

1° *Loi des acides.* — Un équivalent des *divers acides*, combiné avec la *même base*, produit à peu près la même quantité e chaleur.

2° *Loi des bases.* — Un équivalent des *différentes bases*, combiné avec le *même acide*, produit des quantités de chaleur différentes.

3° *Loi des sels acides.* — Lorsqu'un sel neutre se convertit en sel acide, en se combinant avec un ou plusieurs équivalents d'acide, on n'observe aucun changement de température.

Digitized by Google

4° *Lois des sels basiques.* — Lorsqu'un sel neutre se convertit en sel basique, la combinaison est accompagnée d'un dégagement de chaleur.

M. Andrews a fait ses expériences en dissolvant d'abord séparément les acides et les bases solubles dans des quantités d'eau convenables; en laissant revenir les dissolutions à la température ambiante, pour les mêler ensuite et observer le dégagement de chaleur. Pour les bases insolubles, elles étaient simplement mises en suspension dans l'eau; par conséquent les chaleurs observées ont été moindres que si ces bases eussent été dissoutes.

Pour la seconde loi, les bases se sont présentées dans l'ordre suivant :

Magnésie................	4,58 +
Chaux..................	3,94 +
Baryte..................	3,75
Potasse.................	3,62
Soude...................	3,60
Ammoniaque............	3,07
Oxyde de zinc...........	2,73 +
Oxyde de plomb..........	2,21 +
Oxyde d'argent..........	1,79 +

Le signe + qui accompagne les bases insolubles montre qu'elles pourraient prendre un autre rang si l'on connaissait la chaleur qu'elles doivent absorber au moment où elles se dissolvent sous l'influence de l'acide.

M. Andrews a cependant constaté lui-même quelques exceptions remarquables aux lois précédentes. Ainsi le peroxyde de mercure donne bien le même dégagement de chaleur avec l'acide azotique et l'acide acétique; mais avec les acides chlorhydrique, cyanhydrique et iodhydrique, il dégage trois fois, cinq fois, neuf fois plus de chaleur. Pareillement l'acide cyanhydrique se range à la loi commune lorsqu'il agit sur l'oxyde de mercure, et il s'en écarte au contraire quand il agit sur la potasse, la soude, la baryte, et l'ammoniaque; sur les trois premières il ne donne qu'un 5^e de la valeur normale, et sur l'ammoniaque seulement un 14^e.

Les acides phosphorique et arsénique font aussi un peu exception à la troisième loi, car ils donnent un faible dégagement de chaleur lorsqu'ils interviennent pour faire passer leurs sels de l'état neutre à l'état acide.

Il résulte des deux premières lois de M. Andrews, que deux dissolutions de sels neutres, dans leur réaction pour produire des sels nouveaux, ne doivent donner aucun dégagement de chaleur; c'est ce que M. Hess avait déjà indiqué et constaté; mais il avait expliqué ce résultat par d'autres principes.

275. De la chaleur animale. — Les corps organisés semblent se soustraire aux lois générales de la chaleur, car ils ne sont presque jamais à la température des milieux dans lesquels ils vivent. Le corps humain n'est point à la température de l'air qui l'environne. Les animaux des régions polaires sont plus chauds que la glace sur laquelle ils reposent; ceux des régions équatoriales plus froids, en général, que l'air brûlant qu'ils respirent; les oiseaux ne sont point à la température de l'atmosphère, ni les poissons à la température de l'eau où ils sont plongés. Il y a donc dans les corps organisés quelque chaleur propre, ou plutôt quelque moyen de produire, suivant le besoin, de la chaleur ou du froid; car la matière pondérable qui les compose doit nécessairement, comme matière pondérable, être soumise aux lois générales de l'équilibre de température. Cette question de la chaleur des corps vivants se réduit à trois points que nous allons successivement examiner : 1° quelle est leur température? 2° quelles sont les quantités de chaleur qu'ils peuvent produire dans un temps donné? 3° par quels moyens ces quantités de chaleur peuvent-elles être produites?

De la température du corps humain. — La température intérieure paraît être la même dans les différents organes, et elle paraît être la même aussi que celle qu'on obtient en plaçant un petit thermomètre sous la langue, et en tenant la bouche exactement fermée pendant tout le temps que le thermomètre éprouve des variations. Cette température est de 37°; l'état de santé et de maladie, l'âge et le climat n'y peuvent produire que de légères différences. MM. Breschet et Becquerel ont fait dernièrement sur ce sujet un grand nombre d'expériences très-intéressantes avec des appareils thermo-électriques d'une grande sensibilité. M. John Davy a fait sur ce point des observations curieuses dans le cours de ses voyages, et surtout dans une traversée des ports de l'Angleterre à l'île de Ceylan. En prenant à diverses latitudes la température de plusieurs hommes de l'équipage, il a reconnu qu'elle s'accroît en arrivant dans les pays chauds; cet accroissement toutefois est assez faible, car il ne

Digitized by Google

s'élève qu'à 1° environ. En même temps, M. John Davy a pris des températures sur des naturels de Ceylan, sur des Hottentots, sur des nègres de Madagascar et de Mozambique, sur des Albinos, sur des Malais, sur des Cipayes, sur des prêtres de Bouddha, qui ne mangent que des légumes, et sur des Vaidas, qui ne mangent que de la viande. Toutes ces températures sont très-peu différentes : la plus basse de toutes est de 35°,8, elle appartient à deux Hottentots du cap de Bonne-Espérance ; la plus élevée se trouve de 38°,9, elle appartient à deux enfants d'Européens, nés à Colombo, l'un de 8 et l'autre de 12 ans.

M. John Davy a observé aussi les températures d'un grand nombre d'animaux, comme on le voit dans le tableau suivant :

Digitized by Google

NOM DE L'ANIMAL.	Sa température en degrés centigrades.	Température ambiante.	LIEU DE L'OBSERVATION.
	Mammifères.		
Singe	+ 39°,7	+ 30°	Colombo.
Pangolin	26 ,7	27	*Id.*
Chauve-souris	37 ,8	28	*Id.*
Id.	38 ,3	28	*Id.*
V. Vampirus	37 ,8	21	*Id.*
Écureuil	38 ,8	27	*Id.*
Rat commun	38 ,8	26 ,5	*Id.*
Lièvre commun	37 ,8	26 ,5	*Id.*
Ichneumon	39 ,4	27	*Id.*
Tigre	37 ,2	26 ,5	*Id.*
Chien	39 ,0	26 ,5	Kandy.
Id.	39 ,6	»	*Id.*
Jackal	38 ,3	29	Colombo.
Chat commun	38 ,3	15	Londres.
Id.	38 ,9	26	Kandy.
Panthère	38 ,9	27	Colombo.
Cheval (race arabe)	37 ,5	26	Kandy.
Mouton	39°,3 à 40°,0	En été.	Écosse.
Id.	39 ,5 à 40 ,0	19	Cap de Bonne-Espérance.
Id.	40 ,0 à 40 ,5	26	Colombo.
Bouc	39 ,5	26	*Id.*
Chèvre	40 ,0	26	*Id.*
Bœuf	38 ,9	En été.	Édimbourg.
Id	38 ,9	26	Kandy.
Élan femelle	39 ,4	25 ,6	Colombo.
Porc	40 ,5	25 ,6	Dans le Doombera.
Éléphant	37 ,5	26 ,7	Colombo.
Marsouin	37 ,8	23 ,7	En mer ; latitude 8° 23′ N.
	Oiseaux.		
Milan	37°,2	25°,3	Colombo.
Chat-huant	40 ,0	15 ,6	Londres.
Perroquet	41 ,4	24	Kandy.
Choucas	42 ,1	31°,5	Ceylan.
Grive commune	42 ,8	15 ,5	Londres.
Moineau commun	42 ,1	26 ,6	Kandy.
Pigeon commun	42 ,1	15 ,5	Londres.
Id.	43 ,0	25 ,5	Colombo.
Id.	43 ,3	25 ,5	*Id.*
Poules de jungles	42 ,0	25 ,5	Ceylan.
Id.	42 ,5	25 ,5	*Id.*
Poule commune	42 ,5	4 ,5	Édimbourg.
Id.	43 ,3	25 ,5	Colombo.
Id.	42 ,2	25 ,5	*Id.*
Coq vieux	43 ,3	25 ,5	*Id.*
Coq adulte	43 ,9	25 ,5	*Id.*
Poule de Guinée	43 ,9	25 ,5	Près de Colombo.
Coq d'Inde	42 ,7	25 ,5	*Id.*
Pétrel	40 ,3	26	En mer ; latitude 2° 3′ N.
P. Capensis	40 ,8	15	*Id.* latitude 34° S.
Oie commune	41 ,7	25 ,5	Près de Colombo.
Canard commun	43 ,9	25 ,5	*Id.*

Digitized by Google

NOM DE L'ANIMAL.	Sa température en degrés centigrades.	Température ambiante.	LIEU DE L'OBSERVATION.
	Amphibies.		
Tortue	28°,9	26°	En mer; latitude 2° 27′ N.
Id.	29 ,4	32	Colombo.
Tortue geometrica	16 ,9	16	Cap de Bonne-Espérance.
Id.	30 ,5	26 ,6	Colombo.
Rana ventricosa	25 ,0	26 ,7	Kandy.
Iguana	29 ,0	27 ,8	Colombo.
Serpent	31 ,4	27 ,5	*Id.*
Id.	29 ,2	28 ,1	*Id.*
Id.	32 ,2	28 ,3	*Id.*
	Poissons.		
Requin	25°,0	23°,7	En mer; latitude 8° 23′ N.
Bonite, au cœur	27 ,8	27 ,2	*Id.* latitude 1° 14′ S.
Id. dans les musc. intér.	37 ,2	27 ,2	*Id.*
Truite commune	14 ,4	13 ,3	Près d'Edimbourg.
Poisson volant	25 ,5	25 ,3	En mer; latitude 0° 57′ N.
	Mollusques.		
Huître commune	27°,8	27°,8	Près de Colombo
Limaçon	24 ,6	»	Kandy.
	Crustacés.		
Écrevisse	26°,1	26°,7	Colombo.
Crabe	22 ,2	22°,2	Environs de Kandy.
	Insectes.		
Scarabée	6°,0	24°,3	Kandy.
Ver luisant	23 ,3	22 ,8	*Id.*
Blatta orientalis	23 ,9	28 ,3	*Id.*
Id.	23 ,9	23 ,3	*Id.*
Grillon	22 ,5	16 ,7	Cap de Bonne-Espérance.
Guêpe	[illegible] ,4	23 ,9	Kandy.
Scorpion	25 ,3	26 ,1	*Id.*
Julus	25 ,8	26 ,6	*Id.*

Remarques. — Pour les *amphibies*, le nombre qui se trouve dans la colonne de la *température ambiante* est la température de l'air; pour les poissons, l'huître commune et le crabe, c'est la température de la mer.

On voit que les oiseaux sont de tous les animaux ceux dont la température est la plus élevée; les mammifères occupent le second rang; viennent ensuite les amphibies, les poissons et certains insectes; la dernière classe comprend les mollusques et les crustacés, qui sont sensiblement à la température ambiante ainsi

Digitized by Google

que les vers sur lesquels on a jusqu'à présent fait des expériences.

La bonite offre un exemple remarquable : la mer étant à 27°,2, la température de la bonite s'est trouvée de 27°,8 au cœur, et de 37°,2 dans les muscles intérieurs ; le cœur est très-près de la surface.

MM. Becquerel et Breschet ont fait aussi beaucoup d'expériences sur la température des corps vivants, à l'état sain et malades. Leur méthode consiste à employer deux longues aiguilles, analogues à celles qui servent à l'acupuncture, avec cette différence qu'ils les font bimétalliques, les deux métaux de chacune étant soudés vers la pointe et séparés dans le reste de leur longueur par une membrane isolante. On fait communiquer par un premier fil de cuivre les cuivres des deux aiguilles, et par un second fil semblable les deux aciers, en plaçant un galvanomètre dans l'un ou l'autre de ces deux circuits. Dès qu'il y a entre les pointes des deux aiguilles, ou entre les deux soudures, un degré de chaleur un peu différent, l'aiguille du galvanomètre accuse cette différence, que l'on peut ensuite évaluer en degrés thermométriques par une graduation facile. Pour avoir des températures absolues et non plus de simples différences, il suffit de plonger l'une des aiguilles dans un bain ayant une température constante et parfaitement connue. Par cette méthode ingénieuse, MM. Becquerel et Breschet ont constaté :

1° Que, dans le chien, le sang artériel est plus chaud que le sang veineux d'environ 1° ;

2° Qu'il n'y a pas de différence de température sensible entre les habitants des vallées du Rhône et ceux du Saint-Bernard, non plus qu'entre les chiens de ces deux régions ;

3° Que dans l'état de fièvre, la température générale peut s'élever de 1° à 2° ;

4° Que dans plusieurs cas d'inflammation locale, chronique ou accidentelle, la température de l'organe enflammé peut être plus élevée que la température générale ; cette différence s'élève rarement à plus de 1° ou 2°.

276. Quantités de chaleur produites par divers animaux. — Ces quantités de chaleur peuvent être déterminées par le calorimètre, et Lavoisier et Laplace n'avaient pas manqué d'appliquer leur instrument à ce genre de recherches. Dulong a employé un autre moyen, qui est sans doute le plus précis et le plus ingénieux que l'on puisse imaginer ; son beau travail sur ce sujet

n'est point publié, et nous ne pourrons donner ici qu'une idée générale de son appareil et de ses résultats. L'animal que l'on soumet à l'épreuve est enfermé, fort à son aise, dans une caisse de cuivre mince, qui est plongée dans une grande masse d'eau; l'air nécessaire à la respiration lui est fourni par un gazomètre; les produits de la respiration sont conduits au dehors; ils sortent à la température de la masse d'eau; ils sont recueillis et analysés. L'expérience dure environ deux heures, et, par l'élévation de température de l'eau, on juge, après avoir fait toutes les corrections, quelle est la quantité de chaleur qui a été fournie par l'animal en expérience. Dulong a déterminé ces quantités de chaleur avec une grande précision sur des individus de différentes espèces, jeunes ou adultes, carnivores ou frugivores. Ces animaux n'ayant à souffrir ni gêne ni fatigue, on conçoit que s'ils perdent de la chaleur à chaque instant, il faut qu'à chaque instant ils en reproduisent en égale quantité, et nous allons voir par quels moyens.

Causes principales de la chaleur des animaux. — L'air qui a servi à la respiration est altéré comme l'air qui a servi à la combustion. L'oxygène s'est en partie combiné avec du carbone, pour former de l'acide carbonique; donc, il se fait dans les poumons une véritable combustion. Quand Lavoisier eut fait cette découverte, la chaleur animale ne fut plus un mystère : on en vit la source dans le phénomène de la respiration. Cependant, il faut mesurer cette source et savoir si, à elle seule, elle compense exactement les pertes; c'est ce qu'a fait Dulong. Après avoir déterminé, comme nous venons de le voir, la quantité de chaleur perdue par un animal dans un temps donné, il a cherché la quantité de chaleur produite par la respiration. L'air qui est fourni à l'animal est mesuré par le gazomètre, les altérations qu'il éprouve sont données par l'analyse. Voici ce qu'elles sont : 1° il sort plus humide; 2° une partie de l'oxygène est remplacée par de l'acide carbonique; 3° une autre portion de l'oxygène disparaît; 4° l'azote n'éprouve que de faibles variations. Admettant que l'oxygène qui est passé à l'état d'acide carbonique s'est réellement combiné avec du carbone pendant l'inspiration, ou après avoir été absorbé, on peut calculer la quantité de chaleur qui en résulte. Admettant ensuite que la quantité d'oxygène qui a disparu s'est combinée avec de l'hydrogène pour former de l'eau, on peut pareillement calculer la quantité de chaleur qui

en résulte. La somme de ces deux quantités de chaleur représente certainement toute la chaleur que la respiration peut produire; mais pour cela il faut connaître bien exactement les quantités de chaleur dégagées par la combustion du carbone et de l'hydrogène. Or, à l'époque où Dulong fit son travail, si le nombre admis pour le carbone était sensiblement exact, celui de l'hydrogène n'avait que les deux tiers de sa véritable valeur; on croyait que 1 gramme d'hydrogène donnait environ 23000 unités de chaleur, tandis qu'il donne en réalité 34600 unités. Aussi en faisant les calculs avec cette fausse donnée, on ne pouvait reproduire que les 8 dixièmes de la chaleur observée; ce qui laissait une grande latitude aux partisans de l'*innervation*, pour soutenir que l'action de la volonté sur le système nerveux dégage une portion considérable de la chaleur qui est nécessaire à l'homme et aux animaux. Dulong aima mieux croire que les coefficients de la combustion étaient mal déterminés, et c'est là, sans aucun doute, ce qui nous a valu le travail dont nous avons parlé plus haut. En effet, au moyen du nouveau coefficient 34600, on trouve, en faisant le calcul, que les phénomènes chimiques de la respiration suffisent pour rendre compte de toute la quantité de chaleur qui est à chaque instant produite et perdue par les corps vivants.

M. Despretz avait, de son côté, fait sur ce sujet d'importantes recherches qui sont publiées dans les *Annales de Chimie* (t. XXVI); mais les résultats qu'il donne doivent aussi être calculés de nouveau en adoptant 34600 pour la chaleur dégagée par 1 gramme d'hydrogène.

277. Mélanges réfrigérants. — Nous avons déjà indiqué la cause générale du froid qui se produit dans les mélanges réfrigérants. Si, en même temps qu'il y a fusion dans ces mélanges, il n'y avait pas d'action chimique dégageant de la chaleur, on comprend qu'il suffirait de connaître les capacités des éléments et les quantités de chaleur latente pour calculer d'avance le degré de froid que l'on peut obtenir avec des éléments donnés : mais la question est trop complexe pour qu'il soit possible à présent d'en faire l'analyse; nous nous bornerons donc à rapporter les moyens pratiques de faire les mélanges réfrigérants les plus usuels.

Tableau des mélanges réfrigérants.

MÉLANGE DE NEIGE ET DE SEL, OU D'ACIDE ÉTENDU, OU D'ALCALI.		ABAISSEMENT DU THERMOMÈTRE.
Neige	1	de 0° à —17,77.
Sel marin	1	
Hydrochlorate de chaux	3	de 0 à —27,77.
Neige	2	
Potasse	4	de 0 à —28,33.
Neige	3	
Neige	1	de— 6,66 à —51.
Acide sulfurique étendu	1	
Neige ou glace pilée	2	de—17,77 à —20,55.
Sel marin	1	
Neige et acide nitrique étendu		de—17,77 à —43,33.
Hydrochlorate de chaux	2	de—17,77 à —54,44.
Neige	1	
Neige ou glace pilée	1	de—20,55 à —27,77.
Sel marin	5	
Hydrochlorate d'ammoniaque et nitrate de potasse	5	
Neige	2	de—23,33 à —48,88.
Acide sulfurique étendu	1	
Acide nitrique étendu	1	
Neige ou glace pilée	12	de—27,77 à —31,66.
Sel marin	5	
Nitrate d'ammoniaque	5	
Hydrochlorate de chaux	3	de—40 à —58,33.
Neige	1	
Acide sulfurique étendu	10	de—55,55 à —68,33.
Neige	8	

Remarques générales sur les sources de chaleur et de froid. — Les seules sources de chaleur qui nous soient connues sont celles qui résultent des actions électriques, des actions moléculaires et des actions mécaniques. Quelques physiologistes supposent, il est vrai, qu'il y a aussi des forces organiques, différentes des forces chimiques, qui sont capables de développer de la chaleur ; mais, d'après ce que nous venons de voir, les effets calorifiques de ces forces sont loin d'être constatés.

L'incandescence du charbon entre les pôles de la pile, la fusion, la volatilisation des métaux, soit par les courants, soit par les décharges des batteries ordinaires, démontrent assez la puissance calorifique de l'électricité ; on a déjà essayé par diverses expériences de déterminer les quantités de chaleur que des courants d'une intensité donnée peuvent développer : cependant, malgré les recherches récentes qui ont été faites sur ce sujet, cette question est loin d'être résolue ; il y a trop peu longtemps

que l'on sait mesurer les intensités relatives des courants avec une exactitude suffisante.

Les actions moléculaires, considérées comme sources de chaleur, ne comprennent pas seulement les actions chimiques dans leur ensemble et dans toutes leurs particularités, mais elles comprennent aussi les forces expansives des fluides élastiques qui déterminent la formation des vapeurs ou l'augmentation du volume des gaz quand la pression diminue, les actions capillaires et les actions encore peu connues qui se produisent sans doute au contact des corps, quel que soit leur état. C'est à ces actions particulières qu'il faut sans doute rapporter les dégagements de chaleur que j'ai constatés autrefois au contact des solides et des liquides, et qui sont quelquefois tels que l'élévation de température est de 8 ou 10° lorsqu'on mouille un solide avec un liquide qui a bien exactement la même température que lui. C'est probablement encore à ces actions qu'il faut rapporter l'*ignition spontanée* découverte par Dœbereiner, et qui se manifeste lorsque l'éponge de platine se trouve en contact avec un mélange d'hydrogène et d'oxygène, et qui se manifeste aussi, comme l'ont démontré Dulong et M. Thénard, sur certains métaux présentés à certains mélanges gazeux, dans un état de division convenable et sous diverses conditions : l'élévation de température ne va pas toujours jusqu'à l'ignition, mais il suffit qu'elle se produise pour qu'il soit permis d'admettre qu'il y a là une cause analogue à celle qui agit au contact du platine divisé et du mélange d'hydrogène et d'oxygène.

Les actions mécaniques sont aussi très-multipliées et très-diverses, lorsqu'on les considère comme sources de chaleur, mais leurs effets sont toujours analogues. Cependant, lorsqu'on veut apprécier et comparer leurs intensités, il faut tenir compte des actions chimiques qui succèdent quelquefois aux actions mécaniques : ainsi, quand l'amadou s'enflamme dans le briquet à air, ou quand le bois s'enflamme par le frottement, il ne faut attribuer à l'action mécanique que l'élévation de température qui est nécessaire pour déterminer l'action chimique, et non pas l'élévation de température qui résulte de l'action chimique elle-même. Il pourrait même arriver, dans les phénomènes de cette nature, que l'action mécanique favorisât la combinaison des éléments autrement que par l'élévation de température, soit par la disposition particulière qu'elle donne aux molécules, soit par

Digitized by Google

d'autres causes; il est même probable que la détonation des poudres fulminantes, par la friction ou par le choc, est un effet complexe, et que la chaleur produite par l'action mécanique n'est pas la seule force qui détermine l'explosion.

Quand les actions mécaniques agissent seules, comme cela a lieu, par exemple, par le frottement des corps non oxydables, par la compression de l'air dans des vases où il n'y a pas d'éléments combustibles, par la compression des métaux sous l'action du balancier, etc., il devient plus facile de déterminer les quantités de chaleur qui se développent; mais toutes ces questions n'ont pas encore été étudiées avec la suite et le degré de précision qu'elles méritent.

Digitized by Google

LIVRE HUITIÈME.

MÉTÉOROLOGIE.

CHAPITRE PREMIER.

De la chaleur terrestre.

278. Les divers degrés de chaleur ou de froid exerçant une influence plus ou moins directe sur la plupart des phénomènes météorologiques, nous examinerons d'abord la question générale de la distribution de la chaleur dans le sein de la terre et de l'atmosphère. Pour résoudre cette question d'une manière complète, il ne faudrait pas seulement des observations passagères, faites sur quelques points isolés du globe, mais il faudrait des observations séculaires faites avec de bons instruments dans tous les climats différents. Or, nous sommes loin de posséder ces éléments essentiels. La plupart des observations anciennes étaient faites comme par hasard et avec peu de précision; la météorologie de la chaleur ne date en réalité que du commencement de notre siècle; c'est alors que les immenses travaux de M. de Humboldt et les profondes recherches théoriques de Fourier et de Laplace ont puissamment concouru à lui donner son essor et sa véritable direction; les bonnes observations sédentaires se sont multipliées, de nombreux voyages scientifiques ont été exécutés dans les hautes montagnes, sur toutes les mers et dans des pays jusqu'alors inconnus à la science. Les résultats qui ont été recueillis dans le court espace d'un demi-siècle forment déjà un vaste ensemble; et s'ils sont encore incomplets par leur nombre et par la durée qu'ils embrassent, il est vrai de dire qu'ils conduisent à plusieurs grandes questions sur l'état thermométrique du globe, qui peuvent dès aujourd'hui être abordées et discutées avec des données précises.

Ce chapitre est consacré à l'examen de ces questions.

Température de l'air à la surface du sol. — A l'Observatoire

e Paris, les températures de l'air sont observées au moyen de l'appareil suivant (Pl. 48, Fig. 1) : *bb'* est une espèce de tambour composé de deux forts cercles de bois, réunis l'un à l'autre ar des traverses *rr'*; ce tambour peut tourner sur un axe de er *aa'* porté par un support qui est scellé dans le mur. Le thermomètre est représenté en *tt'*; son échelle, qui est en verre, se trouve ajustée contre l'une des traverses *rr'*; il est ordinairement exposé vers l'extérieur; mais lorsqu'on veut faire une observation, l'on fait tourner le tambour pour amener les divisions devant l'œil de l'observateur.

Cet appareil est exposé directement au nord, et ne reçoit par conséquent le soleil que pendant quelques heures le matin et le soir, depuis l'équinoxe du printemps jusqu'à l'équinoxe d'automne; mais on le tourne pour le mettre à l'ombre; il est d'ailleurs abrité de la pluie par un petit toit conique de métal.

On appelle *température moyenne* d'un jour celle que l'on obtiendrait en ajoutant entre elles les observations faites à tous les instants de la journée, et en divisant cette somme par le nombre des instants; mais, comme les changements ne sont jamais ni très-brusques, ni très-irréguliers, on comprend qu'aux observations de chaque instant on peut substituer des observations faites, par exemple, d'heure en heure pendant les 24 heures; de plus, l'expérience a fait voir qu'au lieu d'observer d'heure en heure, on peut adopter les deux méthodes suivantes : 1° prendre la moyenne de trois observations faites, la première au lever du soleil, la deuxième à deux heures de l'après-midi, la troisième au coucher du soleil; 2° prendre la moyenne des deux températures maximum et minimum de la journée. Cette seconde méthode est celle qui est adoptée à l'Observatoire de Paris.

La *température moyenne d'un mois* est la somme des températures moyennes de tous les jours du mois, divisée par le nombre de ces jours.

La *température moyenne de l'année* est la somme des températures moyennes des douze mois, divisée par 12. Mais il est important de remarquer que l'on arrive au même résultat, ou à peu près, par deux autres méthodes : 1° en prenant seulement la moyenne du seul mois d'octobre; 2° en prenant la moyenne des températures correspondant à une seule heure de la journée, qui serait pour notre latitude l'heure de neuf heures du matin.

Enfin, l'on ne cherche la température moyenne de l'année

que pour arriver à la *température moyenne du lieu;* celle-ci est la *moyenne de toutes les moyennes annuelles.* Il faut de nombreuses années d'observations pour obtenir un résultat qui approche un peu de la vérité, et même cette vérité n'existe que sous une condition : elle suppose que les changements de température auxquels une localité se trouve soumise sont des changements qui s'accomplissent par oscillation et non par progression. Si un climat pouvait être d'une manière indéfinie progressivement chaud ou progressivement froid, il ne faudrait pas chercher sa température moyenne sans cesse changeante, il faudrait chercher la loi de la progression croissante ou décroissante de cette température; elle serait irrégulière sans doute, mais elle existerait : tout phénomène durable est soumis à une loi. Les observations tendent à démontrer que tous les climats de la terre sont stables, et que leurs vicissitudes ne sont que des périodes ou des oscillations plus ou moins étendues. Il existe donc une température moyenne propre à chaque lieu, et c'est là une donnée fondamentale que nous avons à déterminer. Dans les climats où les observations de plusieurs années successives donnent des moyennes très-différentes, il faut un très-grand nombre d'années pour obtenir une température moyenne qui approche de la vérité. S'il arrive, par exemple, que la plus grande différence entre les moyennes de vingt années consécutives s'élève jusqu'à 5°, on pourra supposer, avec quelque probabilité, que cent années d'observations donneront une moyenne qui sera encore en erreur de $\frac{5}{100}$ de degré ou de $\frac{1}{20}$ de degré. Au contraire, si la plus grande différence entre ces moyennes ne s'élève qu'à 1°, on pourra supposer que cent années d'observations donneront une moyenne dont l'erreur ne dépassera pas $\frac{1}{100}$ de degré.

Par exemple, à Paris, la moyenne des trente dernières années est de 10°,80, et la différence entre la plus grande et la plus petite de ces moyennes n'atteint pas tout à fait 3°; ainsi la vraie moyenne de Paris est maintenant connue à moins de $\frac{1}{10}$ de degré près. Malheureusement, le nombre des points pour lesquels on a ainsi des moyennes suffisamment approchées est encore excessivement restreint. Cependant, M. de Humboldt a essayé de discuter l'ensemble des résultats connus, et nous devons donner ici une idée du travail qu'il a publié sur ce sujet. (*Mémoires de la Société d'Arcueil*, t. III.)

Lignes isothermes. — Sur un même méridien, la température moyenne diminue en allant de l'équateur vers les pôles, et sur une même verticale la température diminue avec l'élévation absolue. Ainsi, la latitude et la hauteur au-dessus du niveau de la mer sont les deux causes générales qui déterminent la température moyenne d'un point de la terre ; mais l'influence de ces causes est modifiée par une foule d'influences accidentelles ou locales : la distance à la mer, la présence des montagnes, la nature du sol, sa culture et son inclinaison, la direction des vents et tous les phénomènes atmosphériques, sont autant de causes secondaires, tantôt constantes et tantôt variables, qui modifient sans cesse les deux causes générales. On conçoit dès lors qu'il devient très-difficile d'établir de l'ordre au milieu de cette confusion, et de soumettre à une loi commune des phénomènes si variés.

Voici, cependant, quelques définitions qui nous serviront à rapprocher les résultats et à les embrasser dans une seule pensée.

Concevons, par exemple, qu'un voyageur fasse le tour du monde en partant de Paris, et qu'il passe par tous les points de l'hémisphère boréal, pour lesquels la température moyenne est, comme à Paris, 10°,8 ; la route qu'il aura parcourue formera autour de la terre une courbe d'*égale chaleur ;* c'est ce que l'on nomme une *ligne isotherme*. Ainsi, une *ligne isotherme* est celle qui passe par tous les points de la surface de la terre pour lesquels la température moyenne est la même. La ligne isotherme de 10°,8 est loin de coïncider avec le *parallèle* de Paris ; elle est irrégulière et sinueuse, c'est-à-dire qu'elle passe par des points dont la latitude est très-différente de la latitude de Paris. On peut concevoir de même la ligne isotherme correspondant à une autre température moyenne quelconque ; elle pourra être sinueuse comme celle de Paris, mais suivant d'autres lois qui lui sont propres. L'espace compris entre deux lignes isothermes est ce qu'on appelle une *bande isotherme* ou une *zone isotherme*. Ainsi, la zone isotherme de 10° à 5° est celle qui est comprise entre les lignes isothermes de 10° et de 5°.

Nous nous bornerons ici à diviser l'hémisphère boréal en six zones isothermes, savoir :

1° La zone de 30° à 23°,5, c'est la zone torride,

2° . . . . . . de 23,5 à 20

3° La zone de 20° à 15°
4° ...... de 15 à 10
5° ...... de 10 à 5
6° ...... de 5 à 0,

et nous indiquerons seulement les sinuosités générales de ces différentes zones.

Zone torride. — L'ensemble des observations indique que la température moyenne est, sous l'équateur, comprise entre 27°,5 et 28°. Cependant, cette moyenne est modifiée par la grande étendue des mers équatoriales ; sous la ligne, les continents n'occupent que le sixième de la circonférence de la terre. Ainsi, en se rapprochant des tropiques, et particulièrement du tropique du Cancer, nous ne devons pas être étonnés que l'on trouve des températures moyennes qui dépassent sensiblement celle de l'équateur; pour Pondichéry, par exemple, la moyenne est de 29°,6.

Cependant les lignes isothermes de 23°,5 sont très-peu sinueuses ; tout semble indiquer qu'elles ne font que de très-petites excursions de part et d'autre des tropiques.

Zone de 23°,5 à 20°. — Cette zone embrasse des latitudes très-différentes : Alger, qui se trouve à peu près sous le méridien de Paris, est un des points qui s'avancent le plus vers le nord, et l'on reconnaît déjà dans les lignes isothermes qui avoisinent 20° une tendance à être convexes vers le pôle dans leurs points qui correspondent au centre de l'Europe.

Zone de 20° à 15°. — Cette zone passe par les côtes de France sur tout le littoral de la Méditerranée par une latitude moyenne de 43°, et ensuite elle se rabaisse, soit à l'est vers Nangasaki et les côtes du Japon, soit à l'ouest vers Natchez, sur les bords du Mississipi auprès du golfe du Mexique.

Zone de 15° à 10°. — Si l'on prend encore dans cette zone les villes de France dont la température moyenne est de 12 à 13°, on voit que leurs latitudes sont plus grandes que celles des points de même température, soit à l'est comme Pékin, soit à l'ouest comme Cincinnati, New-York et Philadelphie. Aussi, dans la zone tempérée, à latitude égale, le climat d'Europe est plus chaud que les climats de l'Asie et de l'Amérique.

Zone de 10° à 5°. — En comparant les températures moyennes de Fayettleville et de Copenhague, celles de Québec et de Stockholm, celles de Kendal et de Berlin, on reconnaîtra de

Digitized by Google

plus en plus la différence qui existe entre le climat du méridien de Paris et les climats qui sont à l'est et à l'ouest de ce méridien.

Zone de 5° à 0°. — Il est à regretter que l'on ne possède pas dans cette zone quelques séries d'observations dans la Sibérie et dans le nord de l'Amérique. Ces observations seraient d'autant plus intéressantes qu'elles permettraient de tracer avec quelque précision les limites où va s'éteindre la végétation. Cependant cette bande paraît comprendre les latitudes de 60° à 70°.

Régions polaires. — Les diverses expéditions qui ont été faites vers le pôle boréal, dans ces dernières années, ont fourni un grand nombre d'observations précieuses, desquelles il semble résulter que la température du pôle lui-même serait comprise entre 25° et 38° au-dessous de 0.

Températures moyennes des jours, des mois et des saisons, températures extrêmes et climats. — Les climats sont caractérisés, en ce qui dépend de la chaleur, et par la température moyenne de l'année et par les variations que la température des jours, des mois et des saisons, peut éprouver. On peut dire que le climat est *brûlant* dans la zone torride, *chaud* dans la zone de 23°,5 à 20°, *doux* dans la zone de 20° à 15°, *tempéré* dans la zone de 15° à 10°, *froid* dans la zone de 10° à 5°, *très-froid* dans la zone de 5° à 0, et *glacé* dans la zone dont la température moyenne est au-dessous de 0. Mais les climats qui appartiennent à la même zone ou à la même ligne isotherme doivent se distinguer entre eux; et nous proposerons d'appeler *climats constants* ceux qui n'offrent pas de grandes différences dans le cours de l'année entre les extrêmes de la chaleur et du froid; *climats variables* ceux qui offrent d'assez grandes différences; et, d'après Buffon et M. de Humboldt, nous appellerons *climats excessifs* ceux qui offrent de très-grandes différences. Le tableau suivant offrira un exemple de cette distinction.

Noms des lieux.	Température moyenne de l'année.	Température moy. du mois le plus chaud.	Température moy. du mois le plus froid.	Différences.
Funchal	20,3	24,2	17,2	7,0
Saint-Malo	12,3	19,4	5,4	14,0
Paris	10,6	18,5	2,3	16,2
Londres	10,2	18,0	3,2	14,8
New-York	12,1	27,1	3,7	30,8
Pékin	12,7	29,1	—4,1	33,2

Funchal a un climat constant : ce caractère appartient presque toujours au climat des îles.

Saint-Malo, Londres et Paris offrent un exemple de climats variables, tandis que New-York et Pékin ont évidemment des climats excessifs.

Il suffit de réfléchir un instant sur l'influence prodigieuse que la chaleur et le froid exercent sur tous les êtres organisés, pour concevoir que, à température moyenne égale, les productions ne peuvent être les mêmes dans les climats excessifs et dans les climats constants ou variables.

Ce n'est pas seulement par ces distinctions tranchées que les climats peuvent être caractérisés : s'il suffit de quelques degrés de froid de plus pour faire mourir les plantes, et de quelques degrés de chaleur de plus pour faire mûrir les fruits, il est évident aussi que l'époque et la durée des grandes chaleurs et des grands froids sont des éléments indispensables à la connaissance des climats. Ainsi, les observateurs ne doivent pas songer seulement à déterminer les températures moyennes de l'année et les températures moyennes des mois les plus chauds et les plus froids, mais ils doivent parvenir enfin à determiaer la distribution de la chaleur dans tout le cours de l'année, et, pour cela, les observations journalières sont nécessaires. Ces observations une fois faites, il ne reste plus qu'à les combiner, d'après de bonnes méthodes pour arriver aux températures moyennes des jours, des mois et des saisons.

Nous ne terminerons pas cet article sans rapporter encore, d'après M. Arago, les extrêmes de chaleur et de froid qui ont été observés à l'Observatoire de Paris (*Annuaire du Bureau des Longitudes*, 1825).

MAXIMUM DE LA CHALEUR.			MAXIMUM DU FROID.		
Années.	Mois.	Températ. Degrés centigr.	Années.	Mois.	Températ. Degrés centigr.
1706	8 août	+ 35,3	1709	13 janvier	— 23,1
1753	7 juillet	+ 35,6	1716	13 janvier	— 18,7
1754	14 juillet	+ 35,0	1754	8 janvier	— 14,1
1755	14 juillet	+ 34,7	1755	8 janvier	— 15,6
1793	8 juillet	+ 38,4	1768	5 janvier	— 17,1
1793	16 juillet	+ 37,3	1776	29 janvier	— 19,1
1800	18 août	+ 35,5	1783	30 décembre	— 19,1
1802	8 août	+ 36,4	1788	31 décembre	— 22,3
1803	8 août	+ 36,7	1795	25 janvier	— 23,5
1808	15 juillet	+ 36,2	1798	26 decembre	— 17,6
1818	24 juillet	+ 34,5	1823	14 janvier	— 14,5

Il paraît aussi que les plus hautes températures de l'air qui aient été observées sous la zone torride se sont élevées de 40° à 50°, et que Lyon et Ritchie ont même observé une température de 54° à l'oasis de Mourzouck.

D'une autre part, dans les régions polaires, le capitaine Parry a observé quelquefois des températures de 40° à 50° au-dessous de 0, ce qui donne environ 100° pour la limite des variations extrêmes de température que l'air puisse éprouver à la surface de la terre.

Températures à diverses hauteurs au-dessus du sol. — Tout le monde sait que la température décroît à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère ; on en voit une preuve assez frappante dans les neiges éternelles qui couvrent les hautes montagnes, comme les Alpes et les Pyrénées dans nos climats tempérés, le Chimborazo et les volcans de Cotopaxi et d'Antisana, dans la zone torride, presque immédiatement sous la ligne équinoxiale. On a fait beaucoup d'observations pour déterminer la loi de ce décroissement, mais cette loi paraît différente pour les différentes latitudes. Ainsi, dans les régions polaires, à Igloolick, latitude 69° 21', le capitaine Parry a élevé un cerf-volant à 130 mètres environ de hauteur avec un thermomètre *a minima*, et dans cette haute région la température était de 31° au-dessous de 0, comme sur les glaces de la mer.

Sous l'équateur, M. de Humboldt a fait un grand nombre d'observations dont les résultats généraux sont exprimés par le tableau suivant :

Hauteur.	Températ. moyenne.	Différence.
0m	27,5	
1000	21,8	5,7
2000	18,4	3,4
3000	14,3	4,1
4000	7	7,3
5000	1,5	5,5

Ainsi, dans ces régions, sur les flancs de ces montagnes, non moins prodigieuses par leur épaisseur que par leur élévation, le décroissement de la température n'est pas uniforme ; on voit qu'il est le plus petit possible entre 1000 et 3000 mètres. Cette couche de l'atmosphère est, sous l'équateur, la région habituelle des nuages ; c'est là que les vapeurs, plus ou moins condensées,

absorbent en plus grande proportion la chaleur solaire, et l'on ne doit pas s'étonner que cette région soit en effet moins refroidie que celles qui appartiennent à un air plus pur et plus transparent.

Les observations qui ont été faites dans nos climats donnent encore des nombres très-différents. Dans son ascension aérostatique, M. Gay-Lussac a trouvé 174 mètres d'élévation pour 1° d'abaissement. Dans les Alpes on trouve 140 à 150 mètres; dans les Pyrénées, de 238 à 125 mètres. On peut admettre en moyenne environ 200 mètres pour les régions équatoriales, et environ 170 à 180 mètres dans nos latitudes.

279. Limite des neiges perpétuelles. — Il nous reste à examiner maintenant quelles sont, dans les divers climats, les hauteurs auxquelles il faut s'élever pour trouver sur les flancs des montagnes cette limite de séparation entre les cimes toujours neigeuses et les terres qui reçoivent les rayons du soleil, du moins pendant quelques semaines, et qui peuvent produire une végétation plus ou moins active. On avait cru pendant longtemps que là où commencent les neiges éternelles, la température moyenne de l'année est essentiellement la température de la glace fondante; mais M. de Humboldt a démontré par l'expérience qu'il n'en est point ainsi, et les observations de M. Léopold de Buch sur les neiges perpétuelles de la Norwége et de la Laponie ont donné à cette vérité une pleine confirmation. Dans la zone torride, à la limite des neiges, la température moyenne de l'air est de 1°,5 au-dessus de zéro; tandis qu'en Norwége, entre 60° et 70° de latitude, cette température moyenne s'abaisse à 6° au-dessous de zéro. Il n'est pas difficile de se rendre compte de ce phénomène; car, suivant la remarque de M. de Buch, la limite des neiges dépend surtout de la température des mois les plus chauds de l'année; elle s'élève quand cette température est plus haute, et s'abaisse quand cette température est moindre. Or, la température des mois les plus chauds, dans un lieu déterminé, dépend de l'état plus ou moins pur, ou plus ou moins brumeux de l'atmosphère, de la nature et de l'inclinaison du sol, des vents auxquels il est exposé, etc.; et l'on conçoit que, toutes choses d'ailleurs égales, la limite des neiges sera d'autant plus relevée que la masse des neiges sera elle-même moins étendue.

Un pic de petites dimensions qui prendrait naissance dans une

plaine pour s'élancer dans les airs jusqu'à la région des neiges, aurait toujours vers son sommet des mois d'été beaucoup plus chauds qu'un massif énorme qui, après s'être refroidi pendant l'hiver, peut réagir plus longtemps sur l'air tempéré qui l'enveloppe en été, et déterminer au loin un abaissement de température pluso moins sensible.

Nous avons rassemblé dans le tableau suivant les principales observations qui ont été faites jusqu'à présent sur la limite des neiges perpétuelles, depuis l'équateur jusqu'aux latitudes de 60° à 70°

Latitude et nom de l'observateur.	Noms des lieux.	Hauteur de la limite des neiges au-dessus de l'Océan.	Température moyenne.
0 à 10° M. de Humboldt	Rucupichincha, Huaupichincha, Antisana, Corazon, Cotopaxi, Chimborazo	4795m	4,5
14 à 19° M. Pentland	Cordillère orientale du haut Pérou	6200	
	Cordillère occidentale du haut Pérou	5130	
19 à 20° M. de Humboldt	Oribaza, Popocatepetl, Femmeblanche, Nevado de Toluca	4680	
27 à 30° M. Webb	Himalaya (pente méridionale)	3850	
	Himalaya (pente septentrionale)	5000	
42 à 43° Engelhardt et Parrot	Caucase	3216	3,5
Ramond	Pyrénées	2729	
45 à 46°	Alpes	2670	4
M. Wahlenberg 49°	Carpathes	2592	
61° M. Léopold de Buch	Pic de Saletind	1690	6
70° M. Léopold de Buch	Le Storvans-Field	1060	5

Nous ajouterons ici, d'après M. de Humboldt, quelques considérations sur chacune de ces localités (Mém. de M. de Humboldt sur la limite inférieure des neiges, etc., *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XIV, p. 1) :

1° Sous l'équateur, dans le massif prodigieux des Andes, que les Péruviens appellent fastueusement *la Cordillère royale des neiges*, on ne trouve pas d'une cime à l'autre, et pour les diverses saisons de l'année, une oscillation de plus de 25 à 30 mètres dans la limite des neiges.

Dans les plaines habitées d'Antisana, qui sont couvertes d'un

superbe gazon composé d'herbes aromatiques, il tombe quelquefois, à 4200 mètres de hauteur, trois ou quatre pieds de neige, qui se conservent pendant cinq ou six semaines.

Dans le royaume de Quito, on ne voit jamais de neige au-dessous de 3700 mètres, où la température moyenne est d'environ 9°.

La grêle descend plus bas que la neige, à 1000 mètres et même à 600 mètres; il en tombe tous les cinq à six ans une fois, mais il ne paraît pas qu'on en ait jamais vu dans les plaines inférieures.

Il paraît fort douteux qu'en Afrique on trouve près de l'équateur des montagnes assez hautes pour offrir à ces climats le spectacle des neiges éternelles.

2° L'observation de M. Pentland est très-remarquable, puisqu'elle fait voir que, du 14ᵉ au 19ᵉ degré de latitude australe, la limite des neiges est plus élevée que sous l'équateur lui-même; il serait important de connaître l'étendue des oscillations annuelles que cette limite peut éprouver, afin d'en déduire l'influence des plateaux et de la configuration du sol.

3° La limite des neiges ne s'abaisse que de 215 mètres en passant de l'équateur à la latitude de 19 à 20°, c'est-à-dire dans une étendue de 400 lieues.

L'oscillation annuelle des neiges est ici beaucoup plus grande que sous l'équateur; elle atteint quelquefois jusqu'à 600 ou 700 mètres d'étendue.

A peu près à la même latitude, les îles Sandwich présentent à O-Whyhee la cime remarquable de Mowno-Roa, à laquelle on donne plus de 5000 mètres de hauteur; il serait curieux d'en avoir une mesure exacte, car il paraît bien constant qu'elle est parfois entièrement dépouillée de neige.

4° La pente méridionale de l'Himalaya donne la limite des neiges à peu près à la hauteur que l'on pourrait déduire des observations mexicaines; mais la pente septentrionale présente un phénomène bien extraordinaire, puisque, d'après les mesures de M. Webb et les observations qu'il a faites au temple de *Kedarnach* et au *col de Niti*, la limite des neiges s'élèverait à 5000 mètres, c'est-à-dire à une hauteur plus grande que sous l'équateur. C'est assurément dans l'immense étendue des plateaux et dans la configuration du sol qu'il faudrait chercher l'explication de ce phénomène étonnant.

5° Le Caucase et les Pyrénées sont à la même latitude, et cependant la limite des neiges se trouve au Caucase à plus de 400 mètres plus élevée qu'aux Pyrénées. La température des mois les plus chauds dans ces deux contrées donnerait sans doute des indications précieuses sur la cause de cette différence.

6° Les observations de M. Léopold de Buch sur cette vaste chaîne qui sépare la Norwége dans toute sa longueur, et qui s'étend depuis le 58e jusqu'au 71e degré de latitude, sont bien propres à montrer l'influence que l'état brumeux de l'atmosphère peut exercer même sur la limite des neiges. Car on ne peut douter à présent que le relèvement considérable de cette limite jusqu'à 1600 mètres dans ces hautes latitudes, ne soit un effet de ces circonstances et du voisinage de la mer.

Températures à diverses profondeurs au-dessous du sol.

280. De l'existence d'une couche invariable, située à une certaine profondeur au-dessous du sol, et dans laquelle la température reste la même depuis des siècles. — Dès 1671, Cassini avait reconnu que la température des caves de l'Observatoire de Paris n'éprouve aucune variation dans le cours d'une année. En 1730, Lahire avait observé le même fait; mais le comte de Cassini, enlevé récemment à l'Académie des sciences (1846), conçut le premier tout ce qu'il y avait d'important dans ce phénomène remarquable : en 1771, il commença quelques séries d'expériences pour l'étudier, et, le 4 juillet 1783, il établit enfin dans les caves de l'Observatoire, de concert avec Lavoisier, un appareil très-sensible qui devait donner des résultats décisifs Cet appareil, conservé et réparé par les soins de Bouvard, n'a éprouvé aucun changement depuis plus de cinquante ans. Il est disposé de la manière suivante :

Sur le sol des caves, à $27^{m},60$ au-dessous du pavé de l'Observatoire, s'élève un massif en pierre de $1^{m},30$ de hauteur, portant un grand vase de verre vv' (Fig. 2), de 50 centimètres de hauteur sur 35 à 40 centimètres de diamètre. C'est dans ce vase rempli de sable très-fin qu'est ajusté le thermomètre tt'; son échelle hh' est de verre; elle est maintenue dans un cadre de cuivre, qui est lui-même fixé sur les parois de la cloche au moyen des traverses s, s', s'', et des agrafes g, g', g''. Ce thermo-

mètre a été construit autrefois par Lavoisier avec du mercure bien purifié; la boule a environ 7 centimètres de diamètre; le tube est très-fin; un degré occupe sur sa longueur 95 ou 97 millimètres. Ainsi, l'on peut aisément apprécier les demi-centièmes de degré qui occupent encore les $\frac{5}{10}$ d'un millimètre environ. Comme ce thermomètre ne marque que 15° ou 16° au-dessus de 0°, on a ménagé à la partie supérieure de la tige, en *r*, un petit réservoir pour recueillir l'excédant du mercure si la température venait à s'élever au-dessus de 16°.

Les anciennes observations de Cassini et les observations assidues faites pendant trente-deux ans par Bouvard montrent avec évidence que depuis plus de cinquante ans la température des caves de l'Observatoire est parfaitement constante, et égale à 11°,82 : car, dans toute cette période, le thermomètre n'a pas varié de 25 centièmes de degré au-dessus ou au-dessous de 11°,82; et l'on a reconnu, depuis, qu'un courant d'air accidentellement établi dans les souterrains par les travaux des carrières de Paris, avait été la cause bien probable de ces oscillations.

Paris est le seul lieu de la terre pour lequel on ait une aussi belle série d'observations exactes et non interrompues pendant plus d'un demi-siècle; mais un phénomène qui se soutient avec une telle régularité ne peut pas être un phénomène accidentel, et nous en conclurons que dans tous les lieux il existe à une certaine profondeur au-dessous du sol un point dont la température reste constante avec les années, quelles que soient les variations extrêmes qui se développent et qui se succèdent à la surface du sol.

La série de ces points de température invariable forme autour du globe une surface que nous appellerons *couche invariable;* c'est à cette couche que viennent s'éteindre toutes les variations brusques ou périodiqaes que la croûte supérieure de la terre éprouve par les alternatives du jour et de la nuit, par le changement de vent ou par le renouvellement des saisons.

A l'équateur, cette couche invariable paraît être à une petite profondeur au-dessous du sol; cette profondeur augmente avec la latitude, et dans nos climats elle a de 25 à 30 mètres. Dans tous les lieux la température de cette couche paraît être un peu plus élevée que la température moyenne annuelle de la surface, et l'excès paraît augmenter avec la latitude.

Digitized by Google

Ainsi, nous sommes conduits à concevoir au-dessous du sol et tout autour de la terre une certaine couche dont chaque point conserve perpétuellement la même température, qui est à peu près la température moyenne du point de la suface auquel il correspond verticalement; mais en même temps nous devons concevoir que cette couche invariable n'a pas une courbure régulière : les plaines, les montagnes, les vallées, la nature du sol, les lacs, les mers, et mille autres causes peut-être, lui impriment des sinuosités particulières que l'expérience seule pourra nous révéler un jour.

Du mouvement de la chaleur au-dessus de la couche invariable. — Entre la surface du sol et la profondeur de 20 ou 25 mètres, l'on ne connaît qu'un très-petit nombre d'observations, et ces observtions même n'atteignent en général qu'une profondeur de 7 ou 8 mètres. Cependant, leur ensemble conduit aux conséquences suivantes, qui paraissent s'appliquer surtout aux moyennes latitudes de l'hémisphère boréal :

1° Les variations diurnes ne se font sentir qu'à la profondeur d'environ un mètre;

2° Les températures moyennes annuelles des différentes couches diffèrent peu de la température moyenne annuelle de l'air;

3° Les différences entre le maximum et le minimum de chaque couche décroissent en progression géométrique pour les profondeurs qui croissent en progression arithmétique à partir de la surface : ainsi, en représentant par x la profondeur d'une couche, et par d la différence entre son maximum et son minimum, l'on a $d = ab^{-x}$, a et b étant deux constantes que l'on détermine par l'observation; toutefois, cette formule est inexacte pour $x = 0$, c'est-à-dire qu'elle ne produit pas les variations superficielles;

4° L'ensemble des observations démontre qu'à la profondeur de 8 ou 9 mètres, la variation annuelle n'est plus que de 1°; à 15 ou 16 mètres, elle n'est plus que de 0°,1; et à la profondeur de 20 à 25 mètres, elle n'est pas d'un centième de degré;

5° A la profondeur d'environ 8 mètres, là où la variation est de 1°, les saisons sont précisément renversées, c'est-à-dire que le maximum arrive vers le premier janvier, et le minimum vers la fin de juin.

281. De la température à de grandes profondeurs. — Plusieurs observateurs avaient autrefois reconnu que dans les pro-

fondeurs des mines on éprouve une chaleur sensible; mais à cette époque on mettait beaucoup plus d'empressement à expliquer les faits qu'à les observer. On expliquait donc cette chaleur souterraine avant d'en avoir constaté l'existence d'une manière précise, et on l'expliquait diversement : les uns, comme Boyle, l'attribuaient à la décomposition des pyrites, ou plutôt à ces espèces de fermentations auxquelles on avait si souvent recours pour expliquer les faits embarrassants; les autres la regardaient comme une confirmation ou la conséquence de la fameuse hypothèse du *feu central*, qui avait été imaginée dans les temps les plus reculés, et qui était tour à tour adoptée ou rejetée par les philosophes et par les physiciens. Mais quand l'esprit de doute et d'examen eut succédé à l'esprit systématique, quand on en fut venu à chercher la vérité par la voie des données expérimentales et non plus par la voie des subtilités logiques, on comprit que l'existence ou la non-existence de la chaleur souterraine était l'une des plus grandes questions que la physique pût se proposer, et que pour la résoudre, une observation thermométrique serait plus efficace que les plus éloquentes dissertations. Gensanne paraît être le premier observateur qui ait porté le thermomètre à des profondeurs graduellement croissantes, et qui ait découvert ce fait important : que *la température augmente avec la profondeur*. Ces expériences remontent à l'année 1740 : elles furent faites dans les mines de plomb de Giromagny, à trois lieues de Béfort. En 1785, de Saussure fit des expériences analogues dans le canton de Berne. En 1791, M. de Humboldt fit aussi de nombreuses séries d'expériences dans les mines de Freyberg, avec Freiseleben. En 1802, Daubuisson redonna une nouvelle vie à cette question fondamentale et, depuis cette époque, les observations se multiplient en France, en Allemagne, en Angleterre et en Amérique, et presque dans tous les pays où les voyageurs peuvent pénétrer et séjourner assez longtemps.

On profite, en général, pour faire ces observations, des galeries souterraines creusées par l'exploitation des mines, et des sources abondantes qui se rencontrent dans ces percements, mais, dans les pays où il est possible de forer des puits artésiens à de grandes profondeurs, on profite aussi de ces sondages. Dans le premier cas, on établit des thermomètres sédentaires qui sont directement observés; dans le second cas, on est obligé d'avoir

recours aux thermomètres à maximum et à minimum. Ceux de ces appareils qui sont employés avec le plus de succès sont les thermomètres à maximum et à minimum de M. Walferdin, et le thermométrographe; nous allons en indiquer la construction.

Thermomètre à maximum de M. Walferdin. — Cet instrument (Fig. 3), est un thermomètre à mercure ordinaire portant à sa partie supérieure un *réservoir de déversement*, *a*, d'une forme particulière, dans lequel se prolonge en pointe isolée, *b*, le tube de la tige. Admettons que ce thermomètre ait, par exemple, 45° de course, et qu'on veuille observer une température que l'on suppose être de 30° environ : on commence par incliner l'instrument de manière que la pointe *b* plonge dans le mercure de réserve (Fig. 4); on échauffe un peu, et l'on refroidit ensuite à une température inférieure à celle que l'on veut mesurer; alors il passe dans la tige et dans le réservoir inférieur plus de mercure qu'il n'en faut; on redresse l'appareil, et, en donnant une petite secousse, le mercure de réserve quitte la pointe et tombe dans la panse *a*. Cela fait, on plonge le thermomètre dans un bain avec un très-bon thermomètre étalon; on porte le bain, par exemple, à 20°; l'excédant du mercure sort par la pointe, et l'on sait que le tube est exactement plein à 20°. L'appareil est prêt pour l'observation; on peut maintenant le mettre dans son étui et le faire descendre au fond du puits dont on veut avoir la température. Si l'on passe par des couches inférieures à 20°, le mercure descend, et il n'y a à cela nul inconvénient; dès qu'on arrive dans une couche de 20°, le tube se remplit; et enfin, lorsqu'on arrive aux couches qui dépassent 20°, le déversement commence, et il continue jusqu'à ce que le thermomètre se soit mis en équilibre après un temps suffisant. Alors on donne une secousse pour faire tomber la gouttelette de la pointe (Fig. 5); en remontant l'appareil, la colonne descend dans le tube, et, lorsqu'on le tire de l'étui, son sommet est plus ou moins éloigné de la pointe. On le plonge de nouveau dans le bain à 20°, mesurés avec le thermomètre étalon, et l'on voit le point où s'arrête le sommet de la colonne : si ce point répond à 10°, à partir de la pointe, il est évident que la température de la source est 20 + 10.

On pourrait se dispenser de mettre, avant le départ, le thermomètre dans un bain de température connue, mais alors il

faudrait, après l'observation, reproduire artificiellement, et par essais graduels, une température capable de remplir exactement le tube; cette température, mesurée par le thermomètre étalon, serait évidemment la température maximum à laquelle l'appareil aurait été exposé.

Thermomètre à minimum de M. Walferdin. — Cet instrument est représenté dans la figure 6; c'est encore un thermomètre à mercure ordinaire; mais à la partie inférieure de la tige se trouve un petit réservoir d'alcool dans lequel plonge la pointe isolée qui termine le tube, et en même temps il y a à la partie supérieure un réservoir pareillement rempli d'alcool. Si l'on veut, par exemple, observer une température à une grande profondeur dans la mer, que l'on suppose devoir être de 6°, on commence par refroidir l'appareil à 0, par exemple, ou au moins à plusieurs degrés au-dessous de 6°; alors on incline l'appareil pour que le mercure touche la pointe (Fig. 7), et l'on réchauffe un peu pour que la dilatation force le mercure à monter dans la tige; on y fait ainsi passer une colonne qui occupe une longueur de 10° à 15°; cela fait, on redresse l'appareil, on le plonge dans un bain de température connue et supérieure à 6°, par exemple + 12°, puis l'on note la division correspondante au sommet de la colonne de mercure : alors l'appareil est préparé pour l'observation. On le fait descendre dans la mer : si les premières couches sont chaudes, la colonne de mercure est repoussée, et elle peut l'être jusqu'à entrer en partie dans le réservoir supérieur : mais, quand on arrive aux couches froides, le mercure redescend jusqu'à la pointe inférieure; il retombe en partie dans le réservoir jusqu'à ce que l'équilibre soit établi : lorsqu'on le fait remonter, la dilatation soulève la colonne de mercure restante, et il suffit alors de lire, sur le tube, à quel nombre de degrés elle correspond; ce nombre retranché de 12, température du réglage ou du point de départ, donne l'abaissement de la source au-dessous de ce point de départ.

Thermométrographe. — Il se compose d'un réservoir d'alcool, d'une colonne recourbée de mercure et de deux cylindres de fer enveloppés de verre, qui servent d'index (Fig. 9) : l'alcool remplit tout le réservoir *r* et une partie du tube jusqu'en *m*; la colonne de mercure descend jusqu'à la courbure inférieure *i*, et se relève jusqu'en *m'*; au-dessus de *m'* se trouve une autre colonne d'alcool qui remplit en partie le petit réservoir *r'*; un

Digitized by Google

des index est representé de grandeur naturelle dans la figure 10; la petite enveloppe du cylindre de fer est aplatie à l'extrémité par laquelle elle repose sur le mercure, et un cheveu forme une boucle élastique qui presse les parois du tube, et qui est capable de retenir l'index quand il est simplement flottant dans la colonne d'alcool; mais quand l'index est poussé par le mercure, l'élasticité du cheveu ne l'empêche pas de marcher; et c'est ainsi qu'il marche ou qu'il reste en repos, suivant que le mercure le pousse ou l'abandonne. Lorsqu'on veut mettre l'appareil en expérience, on fait descendre les index sur le mercure au moyen d'un aimant. On voit dans la figure 9 que l'index *b* est destiné à marquer les plus basses températures ou les minimum, et l'index *h* les hautes températures ou les maximum.

Le thermométrographe et les thermomètres de M. Walferdin doivent être enfermés dans des étuis métalliques assez forts pour supporter les pressions des couches profondes où l'on veut les faire descendre, et assez hermétiquement clos pour que ces pressions ne puissent pas se transmettre à l'intérieur; la figure 11 représente un de ces étuis : il faut avoir soin de les remplir d'eau à moitié ou aux trois quarts, afin que l'équilibre de température s'établisse le plus promptement possible.

Toutes les observations qui ont été recueillies dans les diverses régions du globe, depuis la couche invariable jusqu'à des profondeurs de 500 mètres, conduisent sans exception aux conséquences suivantes, qui sont maintenant tout à fait incontestables :

1° Au-dessous de la couche invariable où toutes les oscillations du thermomètre de la surface viennent s'éteindre après un affaiblissement graduel, les températures restent parfaitement constantes à toutes les profondeurs, sans éprouver la moindre variation pendant des années, et ces températures constantes vont en croissant à mesure qu'on pénètre à des profondeurs plus grandes.

2° L'accroissement progressif de température varie d'un lieu à un autre dans des limites assez étendues : dans certaines localités, il suffit de s'enfoncer de 14 ou 15 mètres au-dessous de la couche invariable pour obtenir une élévation de température de 1°; dans d'autres localités, au contraire, il faut descendre de plus de 50 ou 60 mètres; en moyenne, on admet en général 25 ou 30 mètres pour 1°; à Paris, le puits de Grenelle, qui descend à une profondeur de 548 mètres, donne de l'eau dont la

température est de 27°,7 ; la température de la couche invariable des caves à 28 mètres étant de 11°,7, c'est un accroissement de 16° pour 528 mètres, et, par conséquent, de 1° pour 33 mètres.

282. Température des sources. — Toutes les sources abondantes ont une température qui varie très-peu dans les différentes saisons de l'année : pour notre hémisphère, elles atteignent en général leur plus haut degré de chaleur vers le mois de septembre, et leur plus grand degré de froid vers le mois de mars : la différence pour ces deux époques extrêmes s'élève à 1° ou 2°. La température moyenne des sources est, comme celle des couches de la terre qu'elles traversent, un peu plus haute que la température moyenne de l'air. Cependant, pour les latitudes élevées, M. Vahlenberg a constaté que cet excès peut atteindre 3 ou 4°. Quelques observations feraient, au contraire, supposer que, sous la zone torride, la moyenne température de l'air l'emporte un peu sur celle des sources.

Quant aux sources thermales, elles atteignent quelquefois des températures voisines de l'ébullition, et tout ce que l'on sait jusqu'à présent sur le gisement de ces sources ne permet pas de décider si elles tiennent ces hauts degrés de chaleur de la profondeur à laquelle elles prennent naissance, ou si elles les tiennent de quelques circonstances particulières aux couches qu'elles traversent. Pour trancher la difficulté, il ne suffit pas de remarquer que, pour plusieurs de ces sources, la température est restée constante pendant de longues années, car on peut bien concevoir des actions locales qui ne s'épuisent pas ou même qui ne s'altèrent pas pendant des siècles : les sources salées que l'on exploite en sont un exemple ; et, si l'on objectait que ces sources viennent peut-être de la mer, et qu'ainsi la cause qui les sale n'est pas une cause locale, on pourrait répondre que cette origine est au moins très-contestable, et qu'au reste il existe un grand nombre de sources minérales qui ne viennent certainement pas de la mer, et qui paraissent tenir en dissolution les mêmes éléments, et en même proportion, depuis un très-grand nombre d'années.

Or, s'il existe des causes locales capables d'introduire dans les eaux, d'une manière invariable et permanente, des éléments qui en modifient la nature, on peut bien admettre aussi qu'il existe des causes locales capables d'en changer la température d'une manière permanente. Nous indiquons ici ces considérations pour

Digitized by Google

montrer seulement que la question n'est pas résolue, et qu'elle offre un beau et vaste sujet de recherches.

On trouve dans plusieurs lieux du globe, et particulièrement près des volcans en activité, des sources thermales jaillissantes, et d'autres éruptions d'eau ou de gaz qui méritent aussi toute l'attention des météorologistes et des géologues. Il importe d'étudier leur température et leur gisement. Nous citerons ici comme exemple la fameuse source du *Geyser*, en Islande. Le Geyser a des éruptions à peu près périodiques; elles sortent d'un bassin qui a environ 23 mètres de profondeur et 60 de diamètre. On entend d'abord un bruit souterrain formidable, et bientôt l'on voit jaillir par l'ouverture du bassin, et jusqu'à la hauteur de 100 mètres au-dessus du sol, d'énormes colonnes d'eau qui entraînent des corps pesants et même des cailloux d'un grand volume. La température de ces eaux est de 82°. Quelquefois les éruptions sont peu nombreuses dans le cours d'une journée; d'autres fois l'on en compte plusieurs dans une minute.

285. De la température des lacs et des rivières, et de leur congélation. — Dans les lacs, les couches supérieures de l'eau éprouvent des variations de température considérables; on sait qu'en hiver elles peuvent se congeler, et qu'en été elles atteignent des températures de 20 à 25°. Mais ce qui arrive à la surface ne se reproduit pas dans les couches plus profondes; il y a dans ces masses de fluides une distribution de la chaleur qui ne se fait ni par les mêmes causes ni suivant les mêmes lois que dans les solides, et il serait très-important de faire des expériences sur ce sujet. De Saussure est, je crois, le premier observateur qui ait abordé cette grande question : il a parcouru la plupart des lacs de la Suisse; il a déterminé leur température à la surface et à diverses profondeurs; et il a constaté ce fait remarquable, que, à de grandes profondeurs, la température des lacs est d'environ 5° : on ne savait pas alors que l'eau a un maximum de densité; mais le dernier fait explique aisément le premier.

Pendant la saison chaude de l'année, deux causes concourent à élever la température des couches supérieures de l'eau des lacs : l'air, qui agit par son contact, et la chaleur solaire, qui pénètre à une profondeur plus ou moins grande. Ces couches échauffées se mêlent de mille manières par l'agitation des vagues; mais elles se mêlent sans tomber au fond, parce qu'elles

sont sans cesse soutenues par leur légèreté spécifique, et parce que la plus grande agitation des vagues ne se fait jamais sentir qu'à une petite profondeur.

Ainsi, en été et jusque vers la fin de l'automne, la température doit être sans cesse décroissante avec la profondeur : c'est en effet ce que montrent les expériences de de Saussure, et ce qui a été constaté depuis par M. Labèche avec un soin particulier (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XIX, p. 77).

Pendant la saison froide, la couche supérieure se refroidit par deux causes, par le contact de l'air froid et par le rayonnement, surtout par le rayonnement nocturne. Cette couche se contracte en se refroidissant; elle acquiert une densité plus grande, et tombe à une petite profondeur en se mêlant aux couches plus chaudes qui étaient au-dessous d'elle; dès qu'elle tombe, elle est remplacée par une autre qui se refroidit et qui tombe à son tour; une autre vient, qui éprouve les mêmes effets; et c'est par ces courants continuellement ascendants et continuellement descendants que toutes les couches supérieures se refroidissent. Mais, il ne faut pas le perdre de vue, toute la chaleur perdue vient se perdre à la surface. Si l'eau n'avait pas un maximum de densité, il est évident que, pendant toute la saison du refroidissement, la température serait encore décroissante avec la profondeur, car, les couches les plus chaudes étant en même temps les plus légères, il faudrait, pour obéir aux lois de l'équilibre, qu'elles fussent aussi les plus élevées. Ainsi, la surface ne pourrait atteindre la température zéro que quand toute la masse serait au moins à la température zéro, et par conséquent il y aurait une congélation simultanée dans toute l'épaisseur du lac, depuis la surface jusqu'à la plus grande profondeur. Mais à cause du maximum de densité, les phénomènes se passent tout autrement : dès que les couches de la surface sont arrivées à la température maximum, elles tombent; d'autres les remplacent qui tombent à leur tour, jusqu'à ce que la masse, dans toute son épaisseur, soit arrivée à cette température limite. Imaginons, pour un instant, que les froids de l'hiver se soient prolongés assez longtemps pour établir cette distribution de chaleur et de densité : le froid continuant, *et toujours par la surface*, la couche supérieure ne pourra plus tomber, car elle devient plus legère en même temps qu'elle devient plus froide; l'abaissement de température pourra donc continuer pour elle

et se prolonger indéfiniment, car elle restera indéfiniment plus légère. Dans une masse parfaitement calme et sans agitation, cette première couche devrait donc se congeler la première, sans que les couches inférieures participassent à l'abaissement de la température, si ce n'est par la conductibilité, qui est toujours très-faible dans les liquides. Mais comme en réalité il se produit toujours une agitation plus ou moins violente, et par conséquent plus ou moins profonde, ce ne sera pas seulement la première couche qui se refroidira au-dessous du maximum, c'est toute l'épaisseur des couches sans cesse mêlées par l'agitation des vagues. Pendant tout ce refroidissement, les couches inférieures resteront à la température constante du maximum jusqu'aux plus grandes profondeurs. Ainsi, à cette époque, la température sera croissante avec la profondeur jusqu'à la première couche, qui est à 4°; et au-dessous de celle-ci, la température sera constante. On ne possède pas beaucoup d'expériences faites pendant la rigueur de l'hiver, mais toutes tendent à confirmer ce résultat.

Voilà pourquoi, dans les lacs profonds, la congélation commence essentiellement par la surface, et ne pénètre jamais que très-lentement à une profondeur un peu considérable.

Le même principe nous fait voir encore que, dans les eaux tranquilles et profondes, il faudra, pour déterminer la congélation, des froids très-rigoureux et très-longtemps prolongés : car il faut que toutes les couches qui ont été réchauffées dans la saison chaude aient pu venir à la surface perdre la chaleur qui les maintient au-dessus de la température maximum; et si ces couches forment une épaisseur de 100 ou 200 mètres, il est évident qu'elles devront, dans les mêmes circonstances, mettre un temps bien plus long à venir tour à tour passer à la surface, pour y perdre leur excès de température, que si elles formaient seulement une épaisseur de 8 ou 10 mètres. Vers les bords, sur les bancs d'une grande largeur et dans tous les lieux où il n'y a qu'une petite profondeur, on verra donc des nappes de glace se former et prendre une grande épaisseur, tandis qu'au large, où la profondeur est grande, la surface reste libre, et la température se soutient au-dessus de zéro.

Cependant il se présente ici une question à résoudre, sur laquelle nous n'avons, jusqu'à présent, que des données incertaines : c'est la question de savoir à quelle profondeur peuvent se

Digitized by Google

faire sentir les chaleurs de l'été. Si, par exemple, elles ne peuvent se faire sentir qu'à 100 mètres, un lac de 5 ou 600 mètres de profondeur ne gèlera pas plus tard qu'un lac de 100 mètres; car, dans le premier, les couches qui sont au-dessous de 100 mètres restant à la température constante du maximum pendant toute la durée de l'année, il est évident qu'elles sont comme si elles n'existaient pas, et qu'on peut les concevoir séparées du reste de la masse sans troubler en rien les phénomènes qui se passent dans les couches supérieures.

Il serait important aussi de faire des expériences sur la température de l'eau à sa surface, au moment de la congélation; car tout semble indiquer que cette température peut s'abaisser au-dessous de zéro, sans que la congélation s'opère, soit que l'agitation continuelle des molécules s'y oppose, soit que d'autres causes encore puissent y concourir.

Si, avant la congélation, la température d'un lac a dû être un instant de 4° dans toute sa profondeur, il est facile de voir qu'après le dégel, le même phénomène doit se reproduire avant que les couches superficielles puissent se réchauffer au-dessus du maximum. Ces deux états d'équilibre supposent toutefois que les causes du réchauffement ou du refroidissement ne sont pas trop brusques pour que les courants ascendants et descendants puissent s'établir avec régularité. Si le contraire arrive, si ces causes agissent brusquement; si, par exemple, un froid soudain et prolongé se fait sentir à l'arrière-saison, dès le mois de décembre, on conçoit qu'il puisse y avoir congélation à la surface, lorsqu'à une certaine profondeur il y aurait encore une température supérieure à celle du maximum.

Dans les *rivières*, la distribution de la chaleur s'accomplit suivant d'autres lois, à cause du mouvement de translation des molécules liquides. Il en résulte en effet un mélange continuel de couches supérieures et inférieures qui tend à établir une température uniforme dans toute la masse. Cependant, comme ce mouvement est différent à la surface et au fond, au milieu du lit et vers les bords, on doit s'attendre à une foule de phénomènes accidentels déterminés par ces circonstances. Parmi ces phénomènes, ceux de la congélation sont les seuls qui aient été observés avec quelque soin. On a constaté, par des expériences décisives, que, dans certains cas, la congélation commence à la surface, et dans d'autres cas, au contraire, elle commence au fond.

Digitized by Google

Quand les rivières *charrient*, on peut dire, en général, que tous ces glaçons, qui se heurtent et qui prennent par le choc des formes arrondies ou anguleuses, ont été primitivement formés à la surface; quelques-uns se sont détachés des bords; mais les autres n'ont été à leur origine que de petits embryons, de petites parcelles flottantes qui ont pris du volume en voguant sur l'eau.

La formation des premiers glaçons n'est pas douteuse, puisqu'on voit les rivages couverts d'une lame de glace qui est sans cesse battue et sans cesse brisée par les flots. C'est là que la congélation commence, parce qu'en général l'eau y est moins profonde, et parce qu'elle est en contact avec un terrain sans cesse refroidi par l'air et par le rayonnement. La glace qui s'y attache se refroidit à son tour par cette double cause, et devient alors, comme le rivage lui-même, un corps froid capable de geler ce qui le touche. Les fragments volumineux, ou même imperceptibles, qui sont brisés dans cette masse, deviennent flottants par leur légèreté spécifique; ils se refroidissent plus que l'eau, et les gouttes qui viennent tomber sur les bords s'y congèlent à l'instant, parce qu'elles deviennent froides et immobiles.

La formation des glaçons, à la surface même de l'eau, loin des rivages et de tous les corps solides, a été révoquée en doute par quelques physiciens : il est difficile, en effet, d'en donner une preuve directe, car, si l'on trouve au large des fragments de glace ou même les rudiments qui les forment, on peut toujours supposer qu'ils viennent des bords, et qu'ils en ont été détachés par les vagues. Mais l'on doit convenir cependant que la surface libre des eaux peut être indéfiniment refroidie au-dessous de zéro, et qu'ainsi elle doit enfin, malgré le mouvement, donner naissance à des aiguilles de glace qui grossissent ensuite en se refroidissant davantage par le contact de l'air et par le rayonnement.

La formation de la glace au fond même de l'eau a été longtemps contestée; mais d'habiles observateurs en ont recueilli des preuves directes, et il s'agit maintenant d'en expliquer la cause, et non plus d'en nier la possibilité. L'eau agitée des fleuves et des rivières peut sans doute être abaissée de plusieurs degrés au-dessous de zéro sans se congeler; et là où la profondeur n'est pas très-grande, toute l'épaisseur de la couche liquide peut participer à cet abaissement de température; les matières

solides du fond peuvent à la fin y participer elles-mêmes par leur contact prolongé avec l'eau, mais, vers le fond, le mouvement est moins rapide qu'à la surface. Les inégalités du sol forment une multitude de petites cellules ou d'espèces d'abris où l'eau n'est que très-faiblement agitée ; alors, on conçoit que la congélation s'y accomplisse, et même qu'elle s'y accomplisse plus tôt qu'à la surface. D'autres causes peut-être peuvent encore favoriser ce phénomène ; mais le rôle que jouent les surfaces solides refroidies n'est pas tel que quelques personnes le supposent ; car, dans l'expérience de Fahrenheit, par laquelle on abaisse l'eau à 10° ou 12° au-dessous de zéro sans qu'elle se gèle, le liquide touche les parois refroidies de la capsule qui le contient, et, dans ses points de contact, il n'éprouve pas plus de congélation que dans les points où la surface est libre.

Pour que les fleuves et les rivières puissent être congelés dans toute leur largeur, il faut un froid très-vif et très-soutenu ; cependant ce phénomène varie avec la hauteur, la vitesse et la profondeur des eaux.

Lorsqu'une rivière est *prise*, la nappe de glace qui la couvre augmente rapidement d'épaisseur dans les premiers instants ; mais, ensuite, le froid pénètre de plus en plus lentement, à cause de l'imparfaite conductibilité de la glace. Le rayonnement des nuits paraît avoir une grande influence sur ce phénomène, car on observe quelquefois les couches très-distinctes qui se sont formées successivement au-dessous les unes des autres. Par exemple, dans l'hiver de 1821, on a compté jusqu'à vingt et une couches distinctes dans des glaces de 15 pouces d'épaisseur, formées sur les lacs qui environnent New-Haven (Amérique). Vers le haut, l'épaisseur des couches variait entre 12 et 18 lignes ; au bas, vers la surface de l'eau, elles étaient seulement de 3 à 6 lignes ; cependant l'on avait bien constaté que le froid avait été toujours croissant.

La glace peut, comme tous les corps, se dilater par la chaleur et se contracter par le froid. Il en résulte souvent de nombreuses fissures qui se forment avec un grand fracas : quelquefois, c'est comme un feu de peloton ; d'autres fois, les coups sont plus terribles que des coups de canon.

Quand les glaces n'ont pas été rompues avant la *débâcle*, elles peuvent trop souvent produire d'effrayants désastres. De

tous les moyens qui ont été imaginés pour prévenir ces malheurs, le plus efficace paraît être d'introduire sous la glace, de distance en distance, des espèces de petites bombes que l'on fait éclater ensuite : l'explosion détermine des fentes nombreuses, et les fragments qui en résultent sont assez petits pour n'être plus redoutables.

284. De la température des mers, et de la formation des glaces polaires. — Dans ces dernières années, plusieurs habiles navigateurs ont parcouru les mers équatoriales et les mers polaires ; ils ont fait partout, sur les températures et sur les phénomènes qui en dépendent, de nombreuses séries d'observations qui sont infiniment précieuses pour la science. Mais c'est dans leurs ouvrages qu'il faut en chercher la discussion détaillée ; nous devons nous borner ici à présenter seulement les conséquences générales auxquelles elles conduisent.

Sur la mer, à de grandes distances des côtes, la température de l'air éprouve en général, dans le cours d'une journée, des variations bien moindres que sur les continents.

Par exemple, sur les mers équatoriales, la différence entre le maximum et le minimum du jour est tout au plus de 1 ou 2°, tandis que sur les continents elle s'élève à 5 ou 6°.

Dans les régions tempérées entre 25 et 50° de latitude, la différence entre le maximum et le minimum du jour reste encore très-petite ; elle atteint rarement 2 ou 3° ; tandis que, sur les continents, la différence est très-grande ; à Paris, elle s'élève quelquefois à 12 ou 15°.

La température minimum est, comme à terre, celle du soleil levant ; mais quelques observateurs pensent que le maximum se trouve près de midi, au lieu d'être à deux ou trois heures.

Lorsque l'on compare la température de l'air à celle que prend la mer à sa surface, on arrive aux résultats suivants :

Entre les tropiques, l'air, dans ses plus hautes températures, est, en général, un peu plus chaud que la surface de l'eau, prise aussi dans ses plus hautes températures.

Mais lorsque l'on prend la température de l'air et de l'eau de quatre heures en quatre heures, comme l'a fait le capitaine Duperrey, et que l'on compare ensuite toutes ces températures, telles qu'elles se sont présentées, on arrive à un résultat inverse, c'est-à-dire, qu'en général l'eau est plus chaude que l'air, même entre les tropiques.

Digitized by Google

Sur 1850 observations faites par cet habile navigateur, entre 0 et 20° de latitude nord ou sud, pendant son voyage autour du monde, la mer a été 1371 fois plus chaude que l'air, et l'air seulement 479 fois plus chaud que la mer.

Dans les latitudes plus élevées, entre 25 et 50°, l'air n'est que très-rarement plus chaud que la surface de l'eau ; et dans les régions polaires, il est presque sans exemple que l'air se trouve aussi chaud que la mer; il est toujours plus froid, et ordinairement beaucoup plus froid.

Si nous examinons maintenant les températures absolues de la mer, à la surface et à diverses profondeurs, nous serons conduits aux conséquences suivantes :

1° Entre les tropiques, la température diminue avec la profondeur ;

2° Dans les mers polaires, la température augmente avec la profondeur ;

3° Dans les mers tempérées, comprises entre 30 et 70° de latitude, la température est d'autant moins décroissante, que la latitude devient plus grande, et, près du parallèle de 70°, elle commence à devenir croissante.

Il existe, par conséquent, une zone pour laquelle la température est à peu près constante, depuis sa superficie jusqu'à une profondeur très-grande.

Après avoir résumé dans les propositions précédentes l'ensemble des observations qui ont été faites jusqu'à présent, il reste à chercher les causes qui peuvent maintenir cette singulière distribution de la chaleur dans la masse mobile des eaux qui remplit le vaste bassin des mers.

On conçoit d'abord pourquoi la surface des eaux ne peut pas être comparée à la surface du sol, ni pour son réchauffement pendant le jour, ni pour son refroidissement pendant la nuit : ce phénomène dépend de la mobilité du liquide, dont les molécules sont sans cesse mélangées jusqu'à une assez grande profondeur, soit par les courants qui résultent des différentes densités, soit par l'agitation des vagues. Pendant le jour, la couche superficielle s'échauffe moins, parce qu'elle se refroidit par l'évaporation, et parce qu'elle est bientôt refoulée par l'agitation ; pendant la nuit, elle se refroidit moins, parce qu'elle se contracte en se refroidissant, et son excès de densité la ferait bientôt retomber, si le mouvement des vagues ne venait pas à cha-

que instant la mélanger aux couches voisines. Ainsi, le réchauffement et le refroidissement sont moins sensibles, parce qu'ils se passent l'un et l'autre dans une couche plus ou moins épaisse.

L'air participe lui-même, par son contact perpétuel, à cette uniformité de température que d'autres causes tendent à maintenir à la surface des eaux.

Mais, pour expliquer la température des couches profondes de la mer, on rencontre de très-grandes difficultés. Sous l'équateur à 1000 brasses de profondeur, la température est seulement de 6 ou 7° : n'est-il pas impossible que l'eau de ces couches ait pu prendre un tel refroidissement dans ces climats, puisqu'à sa surface l'eau ne tombe jamais à une température plus basse que 20 ou 25° ? Vers les pôles, à 700 brasses de profondeur, la température s'élève à 2 ou 3°. N'est-il pas impossible que l'eau de ces couches ait pu prendre un tel réchauffement dans ces contrées, puisqu'à la surface, pendant la saison chaude, quand les navigateurs peuvent sillonner les mers, la température ne s'élève presque jamais au-dessus de zéro ?

Ces difficultés ne sont pas complétement résolues ; cependant on ne peut guère douter que des courants déterminés par la différence des pressions que supportent les couches de même niveau à l'équateur et vers les pôles, ne contribuent puissamment à produire cette distribution de la chaleur. Il paraît certain qu'il y a, en général, un courant superficiel, portant vers les mers polaires l'eau chaude des tropiques, et un courant inférieur rapportant des pôles vers l'équateur l'eau froide des régions polaires ; mais ces courants sont modifiés dans leur direction et leur intensité par une foule de causes qui dépendent de la profondeur des bassins des mers, de leur configuration, et de l'influence du vent et des marées.

L'une des conséquences nécessaires de l'abaissement de température à la surface des eaux est la formation des glaces éternelles qui couvrent les régions polaires. Ce phénomène est l'un des plus grands que nous présente la nature, et nous devons essayer d'en donner une idée.

Nous emprunterons particulièrement au capitaine Scoresby les détails dans lesquels nous pouvons entrer à ce sujet ; son ouvrage a été en quelque sorte écrit sur les lieux. Comme baleinier, Scoresby a fait douze voyages jusqu'aux plus hautes latitudes ; il est à la fois l'un des plus intrépides marins, et l'un des

plus habiles observateurs qui aient fréquenté ces mers périlleuses.

Les glaces que l'on rencontre sur les côtes du Spitzberg et du Groënland ont ordinairement 20 à 25 pieds d'épaisseur; elles forment souvent des plaines immenses dont on n'aperçoit pas les limites du haut des mâts du vaisseau; c'est ce que l'on nomme des *champs de glace*. On peut estimer leur étendue à trois ou quatre cents lieues carrées. Un champ de glace présente quelquefois une surface parfaitement plane, sur laquelle un carrosse pourrait faire trente ou quarante lieues sans obstacle. D'autres fois il est raboteux et inégal; on voit d'espace en espace s'élever des éminences ou des colonnes de 20 ou 30 pieds de hauteur, qui forment un aspect très-pittoresque : tantôt elles ont la belle couleur bleu verdâtre des plus brillantes topazes; tantôt, recouvertes d'une neige épaisse, elles présentent sur leur sommet et à leur contour les accidents les plus variés.

Les ondulations de l'eau, le mouvement des vagues, ou quelque autre cause puissante, brisent un champ de glace en un instant, et le réduisent en fragments de 100 ou 200 mètres carrés. Ces fragments séparés se heurtent et se dispersent, mais quelquefois ils sont emportés par un courant rapide; alors s'ils rencontrent un courant opposé, entraînant les énormes débris d'un autre champ de glace, ces montagnes se choquent avec un épouvantable fracas. Un vaisseau qui se trouverait emporté dans la lutte ne pourrait pas plus résister au choc qu'une lame de verre à une balle de mousquet. On a trop d'exemples d'affreux naufrages produits par cette irrésistible puissance. C'est par les courants de cette espèce que la mer s'ouvre aux navigateurs. C'est quand ils ont balayé les glaces que l'on peut, dans certaines directions, aborder jusqu'aux parallèles de 70 à 80°, où les baleines semblent de préférence fixer leur demeure.

Si quelques montagnes de glace sont brisées et comme pulvérisées dans ces terribles rencontres, il y en a d'autres, au contraire, qui prennent un nouvel accroissement et deviennent plus formidables. Les glaçons, soulevés et balancés par les flots, retombent les uns sur les autres, ils se superposent; ils se couvrent de fragments plus ou moins volumineux, et composent ainsi de véritables montagnes, accidentées de mille manières, qui s'élèvent de 10 à 15 mètres au-dessus des eaux. L'épaisseur qui surnage est, en général, à la partie submergée

Digitized by Google

comme 1 est à 4; ainsi, la hauteur totale de ces montagnes est de 40 à 60 mètres.

Quelquefois aussi des glaçons de 30 ou 40 mètres de longueur, chargés à leurs deux extrémités, s'enfoncent tout à fait sous les eaux à une profondeur assez grande pour que le vaisseau passe au-dessus d'eux; mais l'équipage est alors exposé au plus affreux danger : le moindre choc, la moindre cause peut déranger l'équilibre des poids qui tiennent le glaçon submergé; alors il s'élèverait avec impétuosité, et lancerait le bâtiment dans les airs, ou du moins le ferait chavirer inévitablement.

Dans la baie de Baffin, on trouve des montagnes de glace beaucoup plus hautes que dans les mers du Groënland : les navigateurs en ont mesuré qui s'élevaient à plus de 30 à 40 mètres au-dessus de la surface de l'eau, et qui avaient, par conséquent, plus de 200 mètres de hauteur totale. On suppose que ces masses effrayantes se forment sur les côtes où elles ferment les vallées qui aboutissent à la mer, et qu'ensuite elles sont détachées, soit par la pression des eaux, soit par quelque autre cause. Dans tous ces parages, on voit, en effet, sur les côtes, des montagnes de glace taillées à pic, d'une belle couleur bleue, transparente comme l'azur du ciel, et qui s'élèvent à une hauteur prodigieuse. Dans la *saison du soleil*, les eaux coulent du haut de leur crête, et forment dans la mer d'immenses cascades, qui sont quelquefois surprises par les gelées. C'est alors un majestueux spectacle, mais les navigateurs le regardent de loin : en un instant, ces colonnes, ces arceaux gigantesques, suspendus dans les airs, se brisent avec un horrible fracas et s'écroulent dans la mer.

La profondeur des eaux n'est pas très-grande dans les parages qui avoisinent la côte occidentale du Spitzberg. Les baleines en donnent souvent la mesure d'une manière incontestable : aussitôt qu'elles sont frappées par le harponneur, elles s'enfoncent verticalement sous les eaux avec une incroyable vitesse, emportant le harpon et la ligne; mais elles reviennent bientôt à la surface pour rendre le dernier soupir, et, lorsqu'elles portent l'empreinte de la vase du fond de la mer, on peut juger que la longueur de la ligne qu'elles ont entraînée est la mesure de la profondeur; c'est environ 1000 à 1200 mètres.

Vers le milieu de l'intervalle compris entre le Spitzberg et la côte orientale du Groënland, on n'a pas trouvé de fond à 2500 mètres.

Digitized by Google

Le capitaine Scoresby a vu fréquemment la glace se former en pleine mer à 20 lieues des côtes. Dès que les premiers embryons des cristaux deviennent perceptibles, la mer se calme comme si l'on avait répandu de l'huile à sa surface ; ces cristaux arrivent promptement à la grosseur de 3 ou 4 pouces, et c'est alors qu'ils commencent à s'agglomérer, si le froid continue, pour former des nappes de glace plus ou moins larges, et qui ne tardent pas à avoir deux ou trois décimètres d'épaisseur.

Dans ces contrées, la densité de l'eau de mer est 1,026 ; en état de repos, elle se congèle à — 2°. Les eaux qui ont été concentrées par la gelée peuvent atteindre à une densité de 1,104 ; alors elles ne gèlent qu'à — 10°, et l'on sait que l'eau saturée de sel ne peut se solidifier qu'à — 15°.

Le froid des régions polaires est essentiellement lié à l'étendue et à la profondeur des eaux. Si l'on conçoit, par exemple, une mer libre et profonde, sans îles ni hauts-fonds, occupant toute la calotte des cercles polaires, et communiquant aux mers équatoriales par de larges issues, il est évident que les courants supérieurs et inférieurs tendraient à maintenir l'équilibre de température avec plus d'efficacité. Mais si au milieu de cette vaste mer on conçoit des continents, ou seulement des hauts-fonds, le refroidissement qui a lieu par le rayonnement pendant la longue absence du soleil, devient nécessairement très-intense, puisqu'il se fait sur une surface solide qui ne se renouvelle pas ; l'air se refroidit à son tour sur ces plateaux glacés, et c'est ainsi que se produisent ces froids rigoureux qui règnent au pôle boréal.

Le voyage curieux du capitaine Weddel vers le pôle austral semble annoncer que dans ces régions la mer est beaucoup plus vaste et plus profonde que dans les régions boréales, et qu'en même temps la température y est beaucoup plus douce. Dès qu'on a passé la latitude des nouvelles Orcades et des nouvelles Shetland qui forment une barrière de glace, on arrive dans une mer libre qui paraît se prolonger jusqu'au pôle. De nouveaux voyages nous fourniront bientôt de nouvelles données sur la température de ces climats, et la théorie de la distribution de la chaleur en recevra sans doute de très-grands perfectionnements.

235. De l'équilibre de température de la terre. — Après avoir exposé les principaux résultats des expériences sur la température du globe terrestre et de l'atmosphère qui l'enveloppe, il nous reste à indiquer, autant que nous pouvons le faire dans

Digitized by Google

cet ouvrage, les principales causes qui concourent à maintenir, dans toute l'étendue de la terre, la distribution de la chaleur et l'ordre des températures que l'on y observe.

Imaginons pour un instant que la terre, suspendue comme elle est au milieu des espaces célestes, ne soit plus chauffée ni par les rayons solaires, ni par aucun autre rayon calorifique, et suivons les phénomènes qui en résulteraient.

Toutes les molécules de l'air atmosphérique, douées du pouvoir émissif comme les autres molécules matérielles, rayonneraient leur chaleur dans tous les sens et se refroidiraient de plus en plus, car leurs pertes ne seraient point réparées ; leur densité augmentant, elles tomberaient vers la terre, tandis que d'autres molécules monteraient pour aller se refroidir à leur tour ; et si l'on supposait que la surface de la terre ne peut pas partager avec elles la chaleur qui lui reste, il est évident qu'après un temps plus ou moins long, toutes les couches de l'atmosphère seraient arrivées à un degré de refroidissement dont nous n'avons nulle idée.

Un phénomène analogue se reproduirait sur la terre : les couches de la surface rayonneraient au travers de l'atmosphère ; promptement refroidies par ces pertes non compensées, elles recevraient de la chaleur des couches intérieures, et cette chaleur reçue serait bientôt perdue par la même voie. Ainsi, après quelque temps, ou plutôt après quelques siècles, toute la chaleur du globe de la terre, tant la chaleur centrale et primitive que la chaleur superficielle, et maintenue par le soleil, se trouverait dissipée dans l'espace ; mais cette dissipation serait plus ou moins prompte dans les divers pays, suivant que la surface du sol serait plus ou moins rayonnante, et la conductibilité des couches intérieures plus ou moins parfaite.

Ce qui arrive en supposant que l'atmosphère et la terre ne puissent pas partager leur chaleur, arriverait de même en rétablissant cette propriété de communication que l'on ne peut supprimer que par hypothèse : car l'air pourra bien réchauffer le sol, ou le sol réchauffer l'air ; mais, en définitive, la chaleur totale n'en sera pas moins perdue dans les espaces célestes.

Tout, sur la terre, parviendrait ainsi au *froid absolu*.

Rétablissons maintenant les choses telles qu'elles sont : supprimons encore pour un instant les rayons solaires qui arrivent à la terre, mais considérons les astres innombrables qui occupent

les diverses régions du ciel. Tout nous porte à croire que ces astres si éblouissants de lumière ne sont pas dépourvus de chaleur; il y a donc probablement une certaine température dans les espaces célestes, et le globe de la terre, suspendu au milieu de ces espaces avec l'atmosphère pour enveloppe diathermane, cesserait de se refroidir lorsqu'il se serait mis en équilibre conformément au théorème que nous avons démontré précédemment.

Ainsi, abstraction faite de la chaleur solaire, le globe terrestre serait maintenu à un certain degré de chaleur qui a, sans nul doute, une grande influence sur la température des divers climats, et particulièrement sur la température des pôles. Ce premier point établi, il est évident que l'action calorifique du soleil se fait sentir à son tour avec ses intermittences du jour et de la nuit, et avec ses variations d'intensité qui changent de l'équateur au pôle, suivant les périodes des saisons. Ainsi, l'ordre et la valeur des températures terrestres sont l'effet composé de deux causes sans cesse agissantes : la chaleur de l'espace qui est à peu près uniforme tout autour de la terre, et la chaleur du soleil qui change à tout moment. Déterminer la puissance de chacune de ces causes, telle est la question fondamentale que la science doit se proposer. Avant de donner ici une idée des expériences que j'ai faites pour résoudre cette question, il est essentiel d'indiquer encore les effets du rayonnement nocturne, dont la découverte est due à M. Wells.

Après le coucher du soleil, quand l'air est calme et le ciel serein, toute la surface du sol et l'atmosphère se refroidissent par leur rayonnement vers l'espace, dont la chaleur est insuffisante pour les maintenir à la température qu'ils ont acquise; en même temps les corps solides se refroidissent plus que l'air, parce qu'ils ont un pouvoir émissif plus grand, et M. Wells a constaté qu'ils arrivent ainsi très-promptement à une température qui peut être de 8, 10 ou 12° plus basse que la température de l'air; mais la cause même de cet abaissement montre qu'il est variable d'un corps à un autre, et qu'il est au maximum pour les corps qui ont le plus grand pouvoir émissif et la moindre conductibilité, pourvu qu'ils soient disposés de manière à voir la plus vaste étendue du ciel.

La présence des nuages empêche cet effet, ou du moins l'atténue extrêmement, parce que l'échange se fait alors entre les

Digitized by Google

corps terrestres et les nuages, dont la température est beaucoup plus élevée que la température de l'espace.

Le vent l'empêche pareillement, parce que les corps, refroidis par le rayonnement, sont réchauffés par le contact de l'air qui se renouvelle sans cesse.

Ainsi, depuis le coucher du soleil jusqu'à son lever, quand les circonstances sont favorables (air calme, ciel serein), tous les corps de la terre sont en général à des températures plus basses que l'air : pour les uns, la différence est très-petite; pour les autres, elle peut atteindre 10 ou 12°; ce qui dépend du pouvoir émissif, de la conductibilité, de l'étendue du ciel que le corps peut apercevoir, et de la facilité avec laquelle l'air peut se renouveler sur sa surface.

Ce sont ces effets du rayonnement nocturne qui nous serviront à expliquer, dans le chapitre suivant, les phénomènes de la rosée, du givre et de la gelée; mais ils vont nous servir aussi dans les deux importantes questions dont nous devons encore nous occuper, savoir : la détermination de la chaleur solaire, et de la température de l'espace. Je regrette, toutefois, de ne pouvoir traiter ces questions avec tout le développement qu'elles méritent, le cadre de cet ouvrage me permettant à peine d'en indiquer les points essentiels; je me trouve forcé de renvoyer le lecteur à mon Mémoire et à l'Extrait qui en est publié dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences* (juillet 1838).

Quantité de chaleur donnée par le soleil. — J'ai essayé de déterminer la quantité de chaleur solaire au moyen de deux appareils différents, le *pyrhéliomètre direct* et le *pyrhéliomètre à lentille.*

Le pyrhéliomètre direct est représenté dans la figure 12.

Le vase *v* est très-mince, d'argent ou de plaqué d'argent; il a 1 décimètre de diamètre, et 14 ou 15 millimètres de hauteur; il contient environ 100 grammes d'eau. Le bouchon, qui fixe le thermomètre au vase, s'adapte à un tube de métal qui est porté vers ses extrémités par deux collets, *c*, *c'*, où il joue librement, en sorte qu'en tournant le bouton *b*, tout l'appareil tourne autour de l'axe du thermomètre, et l'eau du vase est sans cesse agitée pour que la température soit bien uniforme dans toute sa masse. Le cercle *d*, qui reçoit l'ombre du vase, sert à orienter l'appareil. La surface du vase qui reçoit l'action solaire est soigneusement noircie au noir de fumée.

L'expérience se fait de la manière suivante : l'eau du vase étant à peu près à la température ambiante, on tient le pyrhéliomètre à l'ombre, mais très-près du lieu où il doit recevoir le soleil ; on le dispose de manière à ce qu'il voie la même étendue du ciel, et là, pendant quatre minutes, on note de minute en minute son réchauffement ou son refroidissement; pendant la minute suivante, on le place derrière un écran, et on l'oriente de telle sorte qu'en ôtant l'écran à la fin de cette minute, qui sera la cinquième, les rayons solaires le frappent perpendiculairement. Alors, pendant cinq minutes, sous l'action du soleil, on note de minute en minute son réchauffement, qui devient très-rapide, et l'on a soin de maintenir l'eau sans cesse en agitation; à la fin de la cinquième minute, on remet l'écran, on retire l'appareil dans la première position, et pendant cinq minutes encore on observe son refroidissement.

Soient g le réchauffement qu'il a éprouvé pendant les cinq minutes de l'action solaire, r et r' les refroidissements qu'il a éprouvé pendant les cinq minutes qui ont précédé cette action et pendant les cinq minutes qui l'ont suivie; il est facile de voir que l'élévation de température t produite par la chaleur du soleil est :

$$t = g + \frac{(r + r')}{2}.$$

Soient d le diamètre du vase, exprimé en centimètres; p le poids de l'eau qu'il contient, exprimé en grammes; p' le poids du vase lui-même et de la portion plongée du thermomètre, ce poids étant réduit à ce qu'il serait pour une chaleur spécifique égale à l'unité : on voit que l'élévation de température observée t correspond à une quantité de chaleur

$$t\,(p + p').$$

Cette chaleur étant tombée en cinq minutes sur une surface $\frac{\pi d^2}{4}$, chaque unité de surface a reçu $\frac{4\,(p + p')}{\pi d^2}\,t$ pendant les cinq minutes, et $\frac{4\,(p + p')}{5\pi d^2}\,t$ pendant 1'.

Pour mon appareil, cette quantité de chaleur reçue en une minute par chaque centimètre carré, est 0,2624 t.

Le pyrhéliomètre à lentille (Fig. 13) se compose d'une lentille *l* de 24 à 25 centimètres de diamètre, d'une distance focale de 60 à 70 centimètres au foyer de laquelle se trouve un vase d'argent ou de plaqué d'argent *a* contenant environ 600 grammes d'eau; la forme du vase et la disposition de la lentille sont combinées de telle sorte que, pour toutes les hauteurs du soleil, les rayons tombent perpendiculairement sur la lentille et sur la face du vase qui est destinée à les recevoir au foyer et à les absorber.

Les expériences se font comme avec l'appareil précédent, et les quantités de chaleur qui tombent en une minute sur chaque centimètre carré se déterminent par une formule analogue; seulement, il y a une correction de plus à faire pour la quantité de chaleur que la lentille absorbe, et cette correction se fait par la comparaison des résultats obtenus avec la lentille et avec l'appareil direct. Parmi les lentilles que j'ai éprouvées, celle qui absorbait le moins absorbait encore $\frac{1}{8}$ de la chaleur incidente.

Il est nécessaire d'employer le pyrhéliomètre à lentille lorsqu'on ne peut pas faire les expériences dans un air calme; le vent, quand il n'est pas fort, n'a que peu d'influence pour refroidir pendant cinq minutes une masse d'eau de plus de 600 grammes, qui n'est élevée que de 4 ou 5° au-dessus de la température ambiante, en sorte que la correction reste toujours assez petite.

Le tableau suivant contient cinq séries d'expériences qui donneront une idée suffisante de la marche du pyrhéliomètre direct. Les élévations de température observées sont dans la troisième colonne; nous indiquerons plus loin comment les nombres de la deuxième et de la quatrième colonne ont été obtenus.

Digitized by Google

HEURES de l'observation.	ÉPAISSEURS atmosphériques ou ε.	ÉLÉVATIONS de température observées.	ÉLÉVATIONS de température calculées.	DIFFÉRENCES.
	Observations du 28 juin 1837.			
7ʰ 30′	1,860	3°,80	3°,69	+ 0,11
10ʰ 30′	1,164	4 ,00	4 ,62	— 0,62
Midi	1,107	4 ,70	4 ,70	0,
1ʰ	1,132	4 ,65	4 ,67	— 0,02
2	1,216	4 ,60	4 ,54	+ 0,06
3	1,370	»	4 ,32	»
4	1,648	4 ,00	3 ,95	+ 0,05
5	2,151	»	3 ,36	»
6	3,165	2 ,40	2 ,42	— 0,02
	Observations du 27 juillet 1837.			
Midi	1,147	4°,90	4°,90	0,
1ʰ	1,174	4 ,85	4 ,86	— 0,01
2	1,266	4 ,75	4 ,74	+ 0,01
3	1,444	4 ,50	4 ,51	— 0,01
4	1,764	4 ,10	4 ,13	— 0,03
5	2,174	3 ,50	3 ,49	+ 0,01
6	3,702	3 ,35	3 ,42	— 0,07
	Observations du 22 septembre 1837.			
Midi	1,507	4°,60	4°,60	0,
1ʰ	1,559	4 ,50	4 ,54	— 0,04
2	1,723	4 ,30	4 ,36	— 0,06
3	2,102	4 ,00	3 ,97	+ 0,03
4	2,898	3 ,10	3 ,24	— 0,14
5	4,992	»	1 ,91	»
	Observations du 4 mai 1838.			
Midi	1,191	4°,80	4°,80	0,
1ʰ	1,223	4 ,70	4 ,76	— 0,06
2	1,325	4 ,60	4 ,62	— 0,02
3	1,529	4 ,30	4 ,36	— 0,06
4	1,912	3 ,90	3 ,92	— 0,02
5	2,603	3 ,20	3 ,22	— 0,02
6	4,311	1 ,95	1 ,94	+ 0,01
	Observations du 11 mai 1838.			
11ʰ	1,193	5°,05	5°,06	— 0,01
12	1,164	5 ,10	5 ,10	0,
1	1,193	5 ,05	5 ,06	— 0,01
2	1,288	4 ,85	4 ,95	— 0,10
3	1,473	4 ,70	4 ,73	— 0,03
4	1,812	4 ,20	4 ,37	— 0,17
5	2,465	3 ,65	3 ,67	— 0,02
6	3,913	2 ,70	2 ,64	+ 0,06

Après avoir obtenu, pendant plusieurs années, un assez grand nombre de séries analogues aux précédentes, j'ai essayé de trouver une loi qui pût représenter assez exactement tous les résultats des observations. Pour cela, j'ai calculé d'abord les épaisseurs atmosphériques que les rayons solaires avaient à traverser dans chaque expérience ; ces épaisseurs ε sont données par la formule :

$$\varepsilon = \sqrt{2rh + h^2 + r^2 \cos^2 z} - r \cos z;$$

r est le rayon moyen de la terre, h la hauteur de l'atmosphère, z la distance zénithale du soleil; j'ai adopté

$$h = 1\,;\ r = 80.$$

Quant à la distance zénithale z, au lieu de la déterminer à chaque fois par l'observation de la hauteur du soleil, j'ai préféré prendre l'heure précise du milieu de l'expérience, et déduire la valeur de z de la formule,

$$\cos z = \sin v \sin d + \cos v \cos d \cos y.$$

v est la latitude du lieu où l'on observe, d la déclinaison du soleil à midi, y l'angle horaire du soleil correspondant à l'heure de l'expérience.

C'est au moyen de ces deux formules que j'ai calculé les épaisseurs atmosphériques rapportées dans la deuxième colonne du tableau précédent.

En comparant les élévations de température observées au pyrhéliomètre et les épaisseurs atmosphériques correspondantes, j'ai vu que l'on pouvait très-bien représenter les résultats par la formule

$$t = ap^{\varepsilon},$$

a et p étant deux constantes. De plus, en déterminant ces deux constantes par deux observations de chaque série, on retombe toujours sur la même valeur de a pour toutes les séries, et sur des valeurs de p assez différentes en passant d'une série à l'autre. Ainsi, a est une constante fixe, indépendante de l'état de l'atmohère, et p une constante qui est fixe seulement pour le même our, et qui varie d'un jour à l'autre suivant que la sérénité du iel est plus ou moins parfaite ; a est donc, dans la formule, la *constante solaire*, ou celle qui contient, comme élément essentiel, la puissance calorifique constante du soleil : tandis que p est la *constante atmosphérique*, ou celle qui contient, comme

élément essentiel, le pouvoir de transmission variable dont se trouve douée l'atmosphère pour laisser arriver jusqu'à la surface de la terre des proportions plus ou moins grandes de la chaleur solaire incidente.

Les expériences donnent pour a la valeur de 6°,72; et pour p les valeurs contenues dans le tableau suivant :

Dates des séries.	Valeurs de p.	Valeurs de $1-p$.
28 juin	0,7244	0,2756
27 juillet	0,7585	0,2415
22 septembre	0,7780	0,2220
4 mai	0,7556	0,2444
11 mai	0,7888	0,2112
Solstice d'hiver	0,7488	0,2512

C'est au moyen de ces valeurs de a et de p, et de la formule

$$t = ap^{\epsilon},$$

que j'ai calculé les résultats contenus dans la quatrième colonne du tableau précédent; on voit avec quelle exactitude se trouvent ainsi reproduits tous les nombres qui avaient été donnés par l'observation, même quand l'observation correspond à des épaisseurs atmosphériques qui sont quadruplées par l'effet de l'obliquité. Ainsi, dans les expériences du 4 mai, les rayons solaires avaient à traverser une épaisseur atmosphérique de 24 lieues à midi, et de 86 lieues à six heures du soir, et cependant le nombre calculé se trouve encore parfaitement d'accord avec le nombre observé. On comprend toutefois que c'est seulement quand le temps est bien fixe et bien établi que la formule peut s'appliquer avec exactitude à une journée entière avec la même valeur de p : s'il survient des changements brusques dans l'état de l'atmosphère, les valeurs de p éprouvent aussitôt une altération plus ou moins grande. J'ai pu m'en assurer par une foule d'expériences correspondant à toutes les saisons de l'année. On peut même présumer que dans certains lieux, surtout dans les pays de montagnes et près des rivages de la mer, les valeurs de p subissent chaque jour des variations périodiques, correspondant à la diffusion et à la condensation des vapeurs.

Si dans la formule précédente on suppose $p=1$, ou $\epsilon=0$, on trouve

$$t = 6°,72;$$

Digitized by Google

c'est-à-dire que le pyrhéliomètre prendrait une élévation de 6°,72, si l'atmosphère pouvait transmettre intégralement toute la chaleur solaire sans en rien absorber, ou si l'appareil pouvait être transporté aux limites de l'atmosphère pour recevoir là, sans aucune perte, toute la chaleur que le soleil nous envoie. Cette valeur de t, multipliée par 0,2624, donne :

$$1,7633.$$

Telle est donc la quantité de chaleur que le soleil donne en une minute sur un centimètre carré, aux limites de l'atmosphère, et qu'il donnerait pareillement à la surface de la terre, si l'air atmosphérique n'absorbait aucun des rayons incidents.

Les valeurs précédentes de p indiquent les proportions de chaleur solaire qui ont été transmises dans les différents jours auxquels elles correspondent, et les valeurs de $1-p$ indiquent, au contraire, les diverses proportions de chaleur solaire qui ont été absorbées aux mêmes époques. Ces valeurs, toutefois, correspondent à $\varepsilon=1$, c'est-à-dire qu'elles indiquent les proportions de chaleur solaire qui auraient été transmises et absorbées dans les lieux qui avaient le soleil au zénith, en y supposant, au moment de l'expérience, le même état atmosphérique qu'à Paris. Il en résulte que, dans le trajet vertical, l'atmosphère absorbe au moins les $\frac{21}{100}$ de la chaleur incidente, et au plus les $\frac{27}{100}$, sans que le ciel cesse d'être serein; je dois ajouter cependant que le 28 juin, auquel correspond l'absorption de $\frac{27}{100}$, on distinguait un léger voile blanc sur la voûte du ciel. D'ailleurs, d'autres observations, pour lesquelles les séries n'ont pas pu être complètes, ne m'ont accusé qu'une absorption de $\frac{18}{100}$. Ainsi, l'on peut dire que l'absorption atmosphérique est comprise entre 18 et 24 ou 25 centièmes, sans qu'il soit possible de distinguer, dans le ciel, des vapeurs qui en troublent la transparence.

Au moyen de cette donnée et de la loi suivant laquelle diminue la chaleur transmise à mesure que l'obliquité augmente, on peut calculer la proportion de chaleur incidente qui arrive à chaque instant sur l'hémisphère éclairé de la terre, et celle qui se trouve absorbée dans la moitié correspondante de l'atmosphère. Et le calcul fait voir que, pour $p=0,75$, la proportion qui arrive au sol reste comprise entre 0,5 et 0,6; et, par conséquent, la proportion absorbée par l'atmosphère se trouve elle-même comprise entre 0,5 et 0,4, mais très-voisine de 0,4.

Ainsi, quand l'atmosphère a toutes les apparences d'une sérénité parfaite, elle absorbe encore près de la moitié de la quantité totale de chaleur que le soleil émet vers la terre, et c'est l'autre moitié seulement de cette chaleur qui vient tomber sur la surface du sol, et qui s'y trouve diversement répartie, suivant qu'elle a traversé l'atmosphère avec des obliquités plus ou moins grandes.

Connaissant la quantité de chaleur que le soleil envoie à la terre pendant une minute, par son action perpendiculaire sur un centimètre carré, il est facile de déterminer la quantité totale de chaleur que le globe entier de la terre et l'atmosphère reçoivent à chaque minute. En effet, cette quantité de chaleur est celle qui tomberait sur le cercle d'*illumination*, si l'hémisphère de la terre, qui est à la fois éclairé et échauffé par le soleil, se trouvait enlevé. Or, la surface de ce cercle d'illumination étant πr^2, la quantité totale de chaleur qu'il reçoit est

$$1{,}7633 . \pi r^2 .$$

Si cette chaleur était uniformément répartie sur tous les points de la terre, chaque centimètre carré ne recevrait, pour sa part, que

$$\frac{1{,}7633 . \pi r^2}{4 \pi r^2} \quad \text{ou} \quad 0{,}4408.$$

Il est facile de voir, d'après cela, que, dans le cours d'une année, la quantité totale de chaleur reçue par la terre de la part du soleil est la même que si, dans cet intervalle, il en entrait, par chaque centimètre carré de la surface qui limite l'atmosphère,

231675 unités.

En transformant cette quantité de chaleur en quantité de glace fondue, l'on arrive au résultat suivant :

Si la quantité totale de chaleur que la terre reçoit du soleil, dans le cours d'une année, était uniformément répartie sur tous les points du globe, et qu'elle y fût employée, sans perte aucune, à fondre de la glace, elle serait capable de fondre une couche de glace qui envelopperait la terre entière, et qui aurait une épaisseur de

$30^{m},89,$

ou près de 31 mètres. Telle est la plus simple expression de la quantité totale de chaleur que la terre reçoit chaque année du soleil.

La même donnée fondamentale nous permet de résoudre une autre question qui paraîtra peut-être plus hardie, et dont la solution est cependant tout aussi simple : elle nous permet de trouver la quantité totale de chaleur qui s'échappe du globe entier du soleil dans un temps donné, sans supposer autre chose, sinon que toutes les portions égales du globe du soleil émettent des quantités de chaleur égales ; ce qui paraît jusqu'à présent confirmé par l'expérience, puisque les différents aspects que nous présente le soleil par l'effet de sa rotation, ne semblent avoir aucune influence marquée sur les températures terrestres.

Considérons le centre du soleil comme le centre d'une enceinte sphérique dont le rayon soit égal à la moyenne distance de la terre au soleil : il est évident que sur cette vaste enceinte chaque centimètre carré reçoit en une minute, de la part du soleil, précisément autant de chaleur que le centimètre carré de la terre, c'est-à-dire, 1,7633 ; par conséquent, la quantité totale de chaleur qu'elle reçoit est égale à sa surface entière, exprimée en centimètres et multipliée par 1,7633, ou à

$$1{,}7633 \,.\, 4\pi d^2.$$

Cette chaleur incidente n'est autre chose que la somme totale des quantités de chaleur émises dans toutes les directions par le globe entier du soleil, c'est-à-dire par une surface $4\pi r^2$, r étant le rayon du soleil. Ainsi, chaque centimètre carré émet pour sa part :

$$1{,}7633 \,.\, \frac{d^2}{r^2} \quad \text{ou} \quad \frac{1{,}763}{\sin^2\omega},$$

ω étant le demi-angle visuel sous lequel la terre voit le soleil, c'est-à-dire 15′ 40″ ; ce qui donne 84888. Ainsi, chaque centimètre carré de la surface solaire émet en une minute

84888 unités de chaleur.

En transformant cette chaleur en quantité de glace fondue, on arrive au résultat suivant :

Si la quantité totale de chaleur émise par le soleil était exclusivement employée à fondre une couche de glace qui serait ap-

pliquée sur le globe du soleil et qui l'envelopperait de toute part, cette quantité de chaleur serait capable de fondre en une minute une couche de $11^{m},80$ d'épaisseur, et en un jour une couche de 16 992 mètres ou 4 lieues et $\frac{1}{4}$.

Cette détermination ne repose, comme on a pu le voir, sur aucune hypothèse ; elle est indépendante de la nature propre du soleil, de la matière qui le compose, de son pouvoir rayonnant, de sa température et de sa chaleur spécifique ; elle est simplement la conséquence immédiate des principes les mieux établis par rapport à la chaleur rayonnante, et du nombre auquel nous sommes parvenus par l'expérience.

Température de l'espace. — Un thermomètre qui est exposé sur le sol au rayonnement nocturne reçoit de la chaleur de deux sources différentes, savoir, de la part de l'espace et de la part de l'atmosphère. La chaleur de l'espace étant soumise à l'absorption comme la chaleur solaire pendant son trajet atmosphérique, il n'y en a en général que les $\frac{3}{10}$ ou les $\frac{4}{10}$ qui puissent arriver au thermomètre ; du moins, en supposant que les expériences ne soient pas faites sur les hautes montagnes. Quant à la chaleur émise par l'atmosphère elle-même dans le cours de la nuit, elle est l'effet du rayonnement individuel de toutes les couches concentriques que l'on peut concevoir depuis le niveau de la mer jusqu'aux limites de l'atmosphère, et elle dépend, par conséquent de la distribution des températures dans toute la hauteur de la colonne atmosphérique ; nous pouvons ajouter que son influence est bien plus considérable qu'on ne l'a supposé jusqu'à présent. Quel que soit, au reste, le rapport des intensités de ces deux causes, il est évident que l'on peut concevoir une cause unique capable de produire un effet égal à celui qui résulte de leur action simultanée ; ou, en d'autres termes, on peut supprimer par la pensée la chaleur de l'espace et celle de l'atmosphère, et concevoir une enceinte, à pouvoir émissif maximum, dont la température soit telle qu'elle envoie au thermomètre et au sol précisément autant de chaleur qu'ils en reçoivent à la fois de l'atmosphère et de l'espace : c'est la température inconnue de cette *enceinte zénithale* que j'appelle la *température zénithale*.

Cette manière de concevoir les phénomènes n'a pas pour objet de représenter les actions particulières et peut-être inégales que le thermomètre éprouve dans telle ou telle direction, mais seu-

lement de représenter avec exactitude l'action définitive et totale à laquelle il est soumis, en sorte que son abaissement au-dessous de la température ambiante se trouve le même avec l'enceinte zénithale qu'avec l'atmosphère et l'espace réunis. C'est sous cette condition qu'il nous est permis de donner à l'enceinte zénithale une température uniforme dans toutes les portions de son étendue. Enfin, il est évident que la température zénithale est nécessairement variable à chaque instant pour le même point de la surface de la terre, et à plus forte raison variable d'un point à un autre, parce qu'elle se compose d'un élément fixe qui est la température de l'espace, et d'un élément sans cesse changeant qui est la température des diverses couches atmosphériques.

Voici, maintenant, comment il est possible d'observer la température zénithale à chaque instant de la nuit, à peu près comme on observe la température de l'air.

Mon appareil, que je nomme *actinomètre*, est représenté dans la figure 14 : il se compose de quatre anneaux de deux décimètres de diamètre, garnis de duvet de cygne, et reposant l'un sur l'autre pour que le duvet ne puisse pas éprouver de compression ; la peau de cygne, elle-même, forme le fond du cercle de chacun de ces anneaux. Ce système est enfermé dans un premier cylindre de plaqué d'argent *c*, enveloppé aussi de peau de cygne, et contenu dans un cylindre plus grand *c'*. Un thermomètre repose au centre du duvet supérieur; le rebord *d* a une hauteur telle que le thermomètre ne puisse voir que les deux tiers de l'hémisphère du ciel; ce rebord est percé de trous, au niveau du duvet, pour que l'air froid s'écoule régulièrement.

Cet appareil est exposé pendant la nuit au rayonnement du ciel, et l'on observe, d'heure en heure, son thermomètre et un thermomètre voisin librement suspendu dans l'air à un demi-mètre au-dessus du sol : c'est de la différence de ces températures ou de l'abaissement de l'actinomètre que l'on déduit la température zénithale ; mais, pour cela, il faut que l'appareil ait été soumis à la graduation que nous allons indiquer.

Si l'actinomètre avait une surface indéfinie, et qu'il fût dans le vide, sous une enceinte hémisphérique maintenue à une température constante, il prendrait évidemment la température de l'enceinte : au contraire, avec sa forme réelle, voyant seulement deux tiers de l'hémisphère et enveloppé d'une couche d'air qui le réchauffe, il doit toujours rester à une température plus élevée

Digitized by Google

que celle de l'enceinte. La graduation a pour objet de déterminer de combien il est réchauffé, de telle sorte qu'il suffise de connaître sa température et celle de l'air ambiant pour en déduire la température de l'enceinte, avec laquelle il est en échange de chaleur rayonnante. On conçoit, en effet, qu'il doive exister un rapport fort simple entre la température de l'enceinte et l'abaissement de l'actinomètre. Pour découvrir ce rapport, j'ai composé un ciel artificiel avec un vase de zinc, d'un mètre de diamètre, soutenu à deux mètres de hauteur par trois colonnes minces; ce vase, dont le fond était noirci, a été rempli d'un mélange réfrigérant à — 20°, et l'actinomètre a été placé verticalement au-dessous, à des distances telles que le thermomètre central en vît successivement des étendues correspondant à $\frac{1}{4}$ d'hémisphère, $\frac{1}{3}$ d'hémisphère et $\frac{2}{3}$ d'hémisphère dans chaque position l'on a attendu l'équilibre de température, et noté en même temps la température de l'air ambiant et celle de l'appareil. Des expériences analogues, répétées à la température de la glace fondante et à d'autres températures intermédiaires, m'ont conduit au résultat suivant : si de la température ambiante on retranche les $\frac{9}{4}$ de l'abaissement de l'actinomètre, on retrouve toujours la température du ciel artificiel. Ce résultat s'applique évidemment à la voûte céleste, ou plutôt à l'enceinte zénithale; par conséquent, si l'on observe pendant la nuit la température t de l'air ambiant, et l'abaissement d de l'actinomètre, on en déduira la température zénithale par la formule

$$z = t - 9\frac{d}{4},$$

qui est le réultat de la graduation.

Le tableau suivant contient les résultats de quelques-unes des expériences :

Tableau des températures moyennes de l'atmosphère qui correspondent aux observations de l'actinomètre, faites pendant les mois d'avril, de mai et de juin.

JOURS.	HEURES.	TEMPÉRATURES de l'air.	TEMPÉRATURES de l'actinomètre.	DIFFÉRENCES.	TEMPÉRATURE zénithale.	TEMPÉRATURE moyenne de l'atmosphère.
	Du 10 au 11 avril.					
10 avril....	7 h. soir.	10°,2	3°,9	6°,3	— 4°,0	—23°,5
	8	9,9	3,0	6,9	— 5,6	—25,5
	9	9,6	2,2	7,4	— 7,0	—27,0
	10	9,0	1,8	7,2	— 7,2	—27,5
11	5 matin.	5,0	— 3,0	8,0	—13,0	—35
	5,30′	5,0	— 3,0	8,0	—13,0	—35
	6	5,5	— 2,3	7,8	—12,0	—34
	Du 14 au 15 avril.					
14 avril....	7 h. soir.	8,5	0,8	7,7	— 6,0	—26
	8	7,0	0,5	7,5	— 9,9	—30,0
	9	5,8	— 1,6	7,4	—10,8	—32
	10	5,0	— 2,4	7,4	—11,6	—33,5
15	4,30′ matin.	1,0	— 6,0	7,0	—14,7	—37,5
	5	1,0	— 6,0	7,0	—14,7	—37,5
	6	1,6	— 5,2	6,8	—13,7	—36,0
	Du 20 au 21 avril.					
20 avril....	8 h. soir.	5,6	— 0,8	6,4	— 8,8	—29,5
	9	4,5	— 2,0	6,5	—10,1	—31,5
	10	3,6	— 3,0	6,6	—11,7	—33,5
21	4,30′ matin.	0,0	— 7,0	7,0	—15,7	—38,5
	5	0,0	— 7,0	7,0	—15,7	—38,5
	5,30′	0,1	— 6,5	6,6	—14,5	—37,0
	Du 5 au 6 mai.					
5 mai......	5 h. soir.	25,50	19,9	5,6	+12,9	— 2,0
	6	25,10	17,5	7,6	8,0	— 8,0
	7	23,10	15,0	8,1	4,9	—12,0
	8	22, 9	13,9	9,0	2,6	— 15,0
	9	21, 5	12,5	9,0	1,4	—16,5
	10	17, 5	10	7,5	0,6	—17,5
6	4 matin.	12, 1	5	7,1	— 3,9	—23,5
	4,30′	12, 1	5	7,1	— 3,9	—23,5
	5	12,	6	6,0	— 1,5	—20,0
	Du 23 au 24 juin.					
23 juin....	7 h. soir.	20,0	12,0	8,0	+ 2,0	—16,0
	8	17,8	10,5	7,3	1,4	—16,5
	9	17,6	10,7	6,9	»	— »
	10	16,3	9,2	7,1	0,3	—18,0
24	4 matin.	11,3	5,3	6,0	— 2,2	—21,0
	4,30′	11,5	5,6	5,9	— 1,8	—20,5

Digitized by Google

Ces expériences constatent que la température zénithale s'abaisse pendant la nuit, à peu près comme la température de l'air ambiant ; cet abaissement progressif, depuis le coucher du soleil jusqu'à son lever, est un fait essentiel qui conduit immédiatement à une conséquence importante.

En effet, la température zénithale se trouve composée de deux termes qui s'ajoutent : l'un, dépendant de la température moyenne t'' de la colonne atmosphérique, qui est variable ; et l'autre, dépendant de la température t' de l'espace, qui est fixe, car on peut démontrer que ces trois températures z, t'' et t' sont liées entre elles par la relation $a^z = ba^{t''} + (1 - b')\,a^{t'}$; a étant la constante du rayonnement 1,0077, b le pouvoir absorbant que l'atmosphère exerce sur la chaleur terrestre, et b' celui qu'elle exerce sur la chaleur de l'espace. Or, puisque la température zénithale éprouve, dans une seule nuit, des variations considérables, c'est une preuve évidente que le terme fixe qui entre dans son expression n'a qu'une très-petite valeur par rapport au terme variable, et par conséquent que, dans le rayonnement nocturne, la chaleur de l'espace est très-petite par rapport à la chaleur qui provient du rayonnement de l'atmosphère.

Cette conséquence ne peut guère se concilier avec les opinions qui attribuent à l'espace une température dont la valeur ne serait pas abaissée au-dessous de zéro d'un très-grand nombre de degrés ; mais elle se concilie parfaitement bien avec les faits connus, qui déjà auraient pu fournir des indications dans ce sens, s'ils avaient été analysés dans leur ensemble avec toute l'attention qu'ils méritent. Les nombreux résultats de M. Wells, de M. Daniell, et de tous les autres physiciens qui ont fait des expériences sur le rayonnement nocturne, ne prouvent pas seulement qu'un thermomètre exposé sur le sol pendant la nuit, dans un lieu découvert, se refroidit de 6, 7, ou même 8° au-dessous de la température ambiante ; ils prouvent encore que ce phénomène se reproduit, presque avec la même intensité, dans les mois les plus froids de l'année, c'est-à-dire en janvier, en février, lorsque la température de l'air est tombée de plusieurs degrés au-dessous de zéro. Ainsi Wilson a observé une différence de près de 9° entre la température de l'air et celle de la surface de la neige ; Scoresby et le capitaine Parry ont observé des abaissements analogues dans les régions polaires, lorsque la température de l'air était à plus de 20° au-dessous de zéro.

Si l'on considère maintenant que le pouvoir réchauffant que la couche d'air exerce par son contact sur le thermomètre du sol, qui est plus froid qu'elle, est à peu près le même, soit qu'elle se trouve à 10° au-dessus de zéro, ou à 10° au-dessous, il en résulte que le pouvoir refroidissant qui maintient ce thermomètre à — 18° dans le second cas, a aussi la même énergie que le pouvoir refroidissant qui le maintient à + 2° dans le premier cas; et, comme ce pouvoir refroidissant dépend de la température de l'espace, il en résulte aussi que la température de l'espace est de beaucoup inférieure à — 18°, car si elle était seulement de — 30° ou de — 40°, le thermomètre qui est à — 18°, tandis que l'air est à — 10°, en serait déjà trop voisin pour que la chaleur de l'espace pût le maintenir au même abaissement au-dessous de l'air, que le thermomètre qui est à + 2° tandis que l'air est à — 10°. Ce qui a peut-être empêché que l'on fît ce rapprochement, c'est qu'en général, dans les explications qui ont été données du rayonnement nocturne, on a attribué aux couches supérieures de l'atmosphère, que l'on savait très-froides, une puissance refroidissante particulière, oubliant en quelque sorte que, froides comme elles sont, c'est cependant de la chaleur qu'elles envoient, et que cette chaleur s'ajoute à celle de l'espace pour en augmenter les effets.

Les résultats que j'ai obtenus au moyen de l'*actinomètre* se trouvent donc d'accord avec l'ensemble des faits connus; il était peut-être essentiel d'en faire la remarque, afin de montrer que si les conséquences auxquelles nous allons parvenir sont en quelques points contraires aux opinions reçues, cela tient à la nature des choses plutôt qu'à l'inexactitude des expériences.

D'autres considérations et d'autres calculs démontrent que la température t' de l'espace se trouve liée aux constantes b et b' par la relation

$$a^{t'} = 1,255\,\frac{2-b}{2-b'} - 0,489\,;$$

et, comme de l'ensemble des expériences solaires on obtient $b' = 0,35$, on arrive définitivement à l'équation

$$a^{t'} = 1,008 - 0,748.\,b,$$

qui ne contient plus comme inconnue que la température de

Digitized by Google

l'espace t' et le pouvoir absorbant b que l'atmosphère exerce sur la chaleur terrestre.

La plus grande valeur de b donne la limite inférieure de la température de l'espace; et, puisque b ne peut pas être plus grand que 1, la température de l'espace ne peut pas être inférieure à

$$-175^{\circ}.$$

Pour $b' = 0{,}3$, on trouverait — 187, et pour $b' = 0{,}4$ seulement — 164.

Cette limite inférieure une fois trouvée, il est facile d'avoir aussi la limite supérieure, car elle correspond à la plus petite valeur qu'il soit possible d'attribuer à b; or, les expériences de température zénithale faisant voir que b est nécessairement plus grand que 0,8, il en résulte que la température de l'espace est moindre que

$$-115^{\circ}.$$

Pour déterminer maintenant le nombre intermédiaire compris entre ces limites, qui représente la vraie température de l'espace à l'époque actuelle, il faudra sans doute des expériences très-multipliées qui s'étendent à toutes les latitudes et à toutes les hauteurs.

Cependant les seules expériences que j'ai pu faire permettent déjà d'arriver à une certaine approximation; elles me donnent

$$-142^{\circ}$$

pour la température de l'espace, et je ne pense pas que cette valeur puisse s'écarter beaucoup de la vérité; elle correspond à $b = 0{,}9$.

Ainsi l'on voit, comme résultat définitif de ces recherches, que le soleil donne à la terre une quantité de chaleur 1,77633 par minute et par centimètre carré; que, par un ciel serein, l'atmosphère absorbe environ les quatre dixièmes de cette chaleur et de celle de l'espace; qu'elle absorbe les neuf dixièmes de la chaleur émise par la terre; et que la température de l'espace à l'époque présente est de 142° au-dessous de zéro.

On ne peut assez faire remarquer l'importance du rôle que joue, dans l'ensemble des phénomènes terrestres, l'inégalité des pouvoirs absorbants de l'air atmosphérique, et, par suite, tous les soins qu'il faudra prendre pour les déterminer avec exactitude. On parviendra sans doute à imaginer, dans ce but, d'au-

Digitized by Google

tres appareils et d'autres méthodes d'expérimentation, au moyen desquels il sera possible de démêler à chaque instant les influences complexes du rayonnement de l'espace et du rayonnement atmosphérique. Si aujourd'hui les diverses régions du ciel qui passent successivement au zénith nous paraissent envoyer des quantités de chaleur égales, il est très-probable que cela ne tient qu'à l'imperfection de nos appareils : nous apercevons de telles différences dans la nature, la distance, le nombre et le groupement des astres parmi les profondeurs de l'espace, qu'il est impossible d'admettre que la portion du ciel, sans cesse changeante, qui se trouve au-dessus de l'horizon, ressemble sans cesse à la portion qui se trouve au-dessous; et, par conséquent, il est impossible que tous les hémisphères que nous pouvons concevoir dans la voûte céleste envoient réellement à la terre une même quantité de chaleur. C'est surtout dans la zone équatoriale qu'il faut chercher d'abord à apprécier ces différences, parce que là elles doivent sans doute paraître plus grandes, plus régulières et plus faciles à observer.

Il me semble nécessaire d'indiquer encore quelques-unes des conséquences les plus générales qui résultent de ces recherches.

La quantité totale de chaleur que l'espace envoie dans le cours d'une année à la terre et à l'atmosphère, se déduit de ce qui précède ; il est facile de voir que cette quantité de chaleur serait capable de fondre sur notre globe une couche de glace de 26 mètres d'épaisseur. Nous avons vu que la quantité de chaleur solaire est exprimée par une couche de glace de 31 mètres. Ainsi, en somme, la terre reçoit une quantité de chaleur représentée par une couche de glace de 57 mètres, et la chaleur de l'espace y concourt pour une quantité qui est les $\frac{5}{6}$ de la chaleur solaire.

Entre les tropiques, la chaleur de l'espace est seulement les $\frac{2}{3}$ de la chaleur solaire, car celle-ci s'y trouve représentée par une couche de glace de 39 mètres.

On sera étonné sans doute que l'espace, avec sa température de — 142° au-dessous de zéro, puisse donner à la terre une quantité de chaleur si considérable, qu'elle se trouve presque égale à la chaleur moyenne que nous recevons du soleil ; ces résultats paraissent, au premier abord, tellement contraires à l'opinion que l'on se fait, soit du froid de l'espace, soit de la puissance du soleil, que l'on sera peut-être disposé à les regarder comme inadmissibles.

Cependant, il faut remarquer qu'à l'égard de la terre, le soleil n'occupe que les 5 millioniêmes de la voûte céleste, et qu'il doit, par conséquent, envoyer deux cent mille fois plus de chaleur pour produire le même effet.

Au reste, en considérant les phénomènes sous un autre point de vue, on sera porté, au contraire, à supposer que, dans ces évaluations, la puissance du soleil se trouve fort exagérée; car, si l'on examine les températures au lieu d'examiner les quantités de chaleur, on arrive à ce résultat :

Que, si le soleil ne faisait pas sentir son action sur notre globe, la température de la surface du sol serait partout uniforme et de

— 89°.

Or, puisque la température moyenne de l'équateur est de 27°,5, il faut en conclure que la présence du soleil augmente la température de la zone équatoriale de

116°,5.

Pareillement, la température moyenne de la colonne atmosphérique serait à l'équateur de

— 149°.

Les formules précédentes font voir qu'elle est d'environ — 10°.

Ainsi, la présence intermittente du soleil augmente de 139° la température moyenne de la totalité de l'atmosphère dans la zone torride.

Cet effet du soleil, pour augmenter les températures terrestres, dépasse de beaucoup celui que Poisson a obtenu en considérant les variations de température à diverses profondeurs au-dessous de la surface du sol; mais il me semble que les deux méthodes donneront des résultats plus concordants, lorsqu'il sera possible d'introduire d'une manière plus directe, dans les formules de Poisson, l'influence si considérable de l'atmosphère.

Pour étendre ces calculs à d'autres régions, il faut tenir compte du décroissement de la température du sol à mesure que la latitude augmente: mais, par approximation, il est facile de reconnaître que les effets du vent concourent à élever la température des régions polaires, en abaissant plus ou moins les températures des régions comprises entre les cercles polaires et les tropiques; la température de la zone équatoriale elle-même paraît peu abaissée par cette cause.

CHAPITRE II.

De l'air et des vapeurs atmosphériques.

286. Observations barométriques. — Les observations barométriques peuvent conduire à la solution de plusieurs problèmes qui ont un très-haut degré d'intérêt; mais il serait facile de s'égarer dans ces recherches, il serait facile de faire une foule d'observations parfaitement exactes, et cependant inutiles. Nous devons donc nous attacher ici à indiquer les principales questions que l'on se propose, et à faire connaître les résultats auxquels on est déjà parvenu. Pour atteindre ce but, nous prendrons pour guide un excellent mémoire, dans lequel Bouvard a discuté avec un soin scrupuleux toutes les observations barométriques de l'Observatoire royal de Paris.

Dans nos climats, on observe le baromètre quatre fois par jour : à neuf heures du matin, à midi, à trois heures après midi, à neuf heures du soir.

L'observation de midi donne la moyenne du mois et de l'année. Les autres observations servent à déterminer les *variations horaires*, ou ce qu'on appelle quelquefois la *période barométrique*.

La hauteur moyenne du baromètre de Paris, donnée par vingt années d'observations, de 1816 à 1836, est de 756 millimètres ; on peut la regarder comme d'autant plus approchée, que les moyennes annuelles extrêmes ne diffèrent pas de plus de 3 millimètres.

En prenant les moyennes correspondant à chaque vent pour cette longue période, on trouve entre elles des différences considérables; la plus grande hauteur moyenne correspond aux vents de nord et de nord-est, la plus petite aux vents de sud et de sud-ouest; l'excès de la première sur la seconde s'élève à plus de 7 millimètres. Neuf années d'observations faites à Metz, par M. Schuster, montrent une influence analogue, bien qu'elle soit moins considérable; et cinq années d'observations faites à Marseille, par Gambart, accusent au contraire une influence presque nulle : le vent du sud donnant toutefois une hauteur

supérieure à la moyenne; les vents d'ouest et de nord-ouest une hauteur inférieure.

Les variations diurnes du baromètre exigent des soins assidus et des instruments très-parfaits; elles se déduisent, comme nous l'avons dit, des trois observations de neuf heures du matin, de trois heures et de neuf heures du soir.

Les résultats obtenus par Bouvard sont contenus dans le tableau suivant :

Hauteurs moyennes annuelles du baromètre pour les différentes heures du jour, et variations diurnes moyennes qui s'en déduisent.

ANNÉES.	A 9 HEURES du matin.	A 3 HEURES du soir.	A 9 HEURES du soir.	PÉRIODE du matin.	PÉRIODE du soir.
	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
1816	754,359	753,683	754,051	0,676	0,375
1817	756,676	755,914	756,640	0,762	0,597
1818	756,382	755,473	755,961	0,909	0,488
1819	755,343	754,581	754,993	0,762	0,412
1820	756,325	755,611	755,973	0,714	0,362
1821	756,276	755,598	756,068	0,678	0,470
1822	757,728	757,011	757,310	0,717	0,382
1823	755,197	754,493	754,773	0,704	0,280
1824	755,984	755,269	755,569	0,715	0,300
1825	757,966	757,122	757,224	0,844	0,402
1826	757,584	756,756	757,087	0,828	0,331
Moyennes......	756,347	755,591	755,956	0,756	0,373

On voit que la plus petite valeur de la période de neuf heures du matin à trois heures du soir, ou *période du matin*, est plus grande que la plus grande valeur de la période de trois heures du soir à neuf heures du soir, ou *période du soir*; et que, dans chaque période, les différences sont assez petites en passant d'une année à l'autre. La dernière ligne fait voir le résultat définitif, ou les valeurs moyennes conclues de ces onze années. Ainsi, la période du matin est un peu plus grande que *trois quarts* de millimètre, et la période du soir un peu plus grande qu'*un tiers* de millimètre.

Il était curieux de rechercher l'influence des saisons sur ces résultats, et, pour y parvenir, il suffisait de chercher les valeurs

Digitized by Google

moyennes des périodes pour chacun des mois, pendant les onze années d'observations : ces moyennes sont contenues dans le tableau suivant :

Hauteurs moyennes du baromètre réunies par mois de même dénomination.

DE 1816 A 1817.	A 9 HEURES du matin.	A 3 HEURES du soir.	A 9 HEURES du soir.	PÉRIODE du matin.	PÉRIODE du soir.
	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
Janvier........	758,106	757,429	757,690	0,677	0,261
Février........	758,165	757,236	757,557	0,929	0,321
Mars...........	756,203	755,406	755,823	0,797	0,500
Avril..........	755,253	754,243	754,780	1,010	0,537
Mai............	755,253	754,440	754,786	0,813	0,346
Juin...........	757,307	756,600	756,875	0,707	0,275
Juillet........	756,554	755,817	756,140	0,737	0,323
Août...........	756,807	755,953	756,271	0,854	0,318
Septembre......	756,773	755,972	756,432	0,801	0,460
Octobre........	754,772	754,021	754,522	0,751	0,501
Novembre......	755,822	755,277	755,660	0,545	0,383
Décembre......	755,152	754,703	754,950	0,449	0,247
Moyennes......	756,347	755,591	755,950	0,756	0,373

Les conséquences que présente ce tableau sont :

1° Que la période du soir n'éprouve que des variations petites et irrégulières dans les différents mois;

2° Que la période du matin éprouve au contraire des variations considérables et dans lesquelles se laisse apercevoir une sorte de régularité ; car la valeur de cette période se maintient constamment moindre pendant les trois mois de novembre, décembre et janvier, constamment plus grande pendant les trois mois de février, mars et avril, et conserve une valeur intermédiaire et variable pendant les six autres mois de l'année.

Il importe de chercher les résultats analogues dans les différents climats.

Enfin, la période barométrique est soumise aussi à l'influence du vent : elle est presque nulle par les vents du sud, et atteint son maximum par les vents du nord.

Outre les deux périodes du matin et du soir, dont nous venons de parler, il y a aussi deux *périodes de nuit :* le baromètre descend depuis neuf heures du soir à quatre heures du matin environ, et remonte depuis quatre heures du matin à neuf heures

du matin, où il atteint son maximum. Ces périodes ont été constatées et mesurées par M. de Humboldt dans toute l'Amérique équatoriale : mais le baromètre n'étant pas régulièrement observé à Paris pendant la nuit, on ne sait si ses oscillations sont régulières, et si elles reproduisent dans une certaine proportion les périodes équatoriales.

Tout ce qu'il est donc possible de faire à présent est de comparer les périodes du matin et du soir dans les différents climats, et même, comme la période du matin a une valeur plus grande, c'est à celle-là que l'on peut s'arrêter pour cette comparaison.

Voici les résultats qui ont été publiés sur ce sujet par M. de Humboldt :

Tableau des variations diurnes du baromètre, suivant les latitudes.

OBSERVATEURS.		PÉRIODE diurne.
		mm.
Humboldt et Bonpland	Amérique équatoriale, lat. 23° nord à 12° sud entre 0^t à 1500^t d'élévation	2,55
La Condamine	A Quito, au Pérou, à 0° de lat. et à 1492^t au-dessus de la mer	2,82
Duperrey	A Payta, côte du Pérou, lat. 5°, au niveau de la mer	3,40
Boussingault et Rivero	Santa-Fé de Bogota, à 4°35′ nord, à 1366^t d'élévation	2,39
Dorta, Freycinet et Erchwege	La Guiara, lat. 10°36′ nord, au bord de la mer	2,44
	Brésil, Rio-Janeiro, lat. 22°54′ sud, et aux Missions des Indiens	2,34
Léopold de Buch	Las Palmas, Canaries, lat. 8°28′ nord	1,10
Coutelle	Au Caire, Égypte, lat. 30°2′ nord	1,75
Marqué-Victor	Toulouse, lat. 43°34′ nord	1,20
Gambart	Marseille, lat. 43°18′ nord	0,72
Billet	Chambéry, lat. 45°34′ nord, 137^t d'élévation	1,00
Ramond	Clermont-Ferrand, lat. 45°46′ nord, 210^t	0,94
Herrenschneider	Strasbourg, lat. 48°34′ nord	0,80
Bouvard aîné	Paris, Observatoire, lat. 48°50′ nord	0,76
Nell de Bréauté	La Chapelle, près Dieppe, lat. 49°55′ nord	0,36
Bass et Sommer	Königsberg, lat. 54°12′ nord	0,20
Parry	Lat. 74° nord	0,00

Ainsi, la période du matin, à peu près constante sous l'équateur dans toute la zone des tropiques et jusqu'à la hauteur de 3000 mètres, diminue ensuite rapidement à mesure que la latitude augmente. C'est sans doute dans cette loi de diminution progressive que l'on doit chercher les causes du phénomène lui-même; tout semble indiquer qu'il tient à la température plus encore qu'à la position du soleil.

Digitized by Google

M. Flaugergues a constaté, par vingt années d'observations faites à Viviers (Ardèche), depuis 1808 à 1828, que les hauteurs moyennes de midi offrent des différences sensibles pour les différentes phases de la lune, comme l'indique le tableau suivant (*Annuaire*, 1833) :

Nouvelle lune	755,48	Pleine lune	755,30
Premier octant	755,44	Troisième octant	755,69
Premier quartier	755,40	Deuxième quartier	756,23
Deuxième octant	754,79	Quatrième octant	755,50

Ainsi, la hauteur semble décroissante depuis la nouvelle lune jusqu'au deuxième octant, pour devenir croissante ensuite, et atteindre son maximum au deuxième quartier.

On trouve pareillement pour le périgéee 754,73, et pour l'apogée 755,73.

Pour reconnaître si cette influence appartient à la lune seule ou à l'action combinée de la lune et du soleil, il serait sans doute nécessaire de discuter les moyennes correspondant à diverses heures de la journée.

M. Schübler a étudié sous un autre point de vue l'influence de la lune, en discutant les nombres de jours de pluie correspondant aux différentes phases, pour un grand nombre d'observations faites à Munich de 1781 à 1788, à Stuttgard de 1809 à 1812, et à Munich de 1813 à 1828. Il en résulte que si l'on prend un intervalle de temps assez grand pour qu'il comprenne 10 000 jours pluvieux, les nombres de jours de pluie correspondants, pour le jour de la nouvelle lune, le jour du premier octant, etc., seront conformes au tableau suivant (*Annuaire*, 1835) :

Nouvelle lune	306	Pleine lune	337
Premier octant	306	Troisième octant	313
Premier quartier	325	Deuxième quartier	284
Deuxième octant	341	Quatrième octant	290

Ces influences sur les jours de pluie doivent sans doute être liées à l'influence sur la hauteur moyenne du baromètre.

Dans toutes les observations barométriques, il y a en général deux corrections essentielles à faire : l'une pour la capillarité, et l'autre pour la température.

Voici la table qui est adoptée pour les corrections de la capillarité :

Dépression du mercure dans le baromètre due à sa capillarité.

DIAMÈTRE intérieur du tube.	Dépressions.	Différences.	DIAMÈTRE intérieur du tube.	Dépressions.	Différences.
mm	mm	mm	mm	mm	mm
21,00	0,028	0,004	11,50	0,293	0,037
20,50	0,032	0,004	11,00	0,330	0,042
20,00	0,036	0,005	10,50	0,372	0,047
19,50	0,041	0,006	10,00	0,419	0,054
19,00	0,047	0,006	9,50	0,473	0,061
18,50	0,053	0,007	9,00	0,534	0,070
18,00	0,060	0,008	8,50	0,604	0,080
17,50	0,068	0,009	8,00	0,684	0,091
17,00	0,077	0,010	7,50	0,775	0,102
16,50	0,087	0,012	7,00	0,877	0,118
16,00	0,099	0,013	6,50	0,995	0,141
15,50	0,112	0,015	6,00	1,136	0,170
15,00	0,127	0.016	5,50	1,306	0,201
14,50	0,143	0,018	5,00	1,507	0,245
14,00	0,161	0,020	4,50	1,752	0,301
13,50	0,181	0,023	4,00	2,053	0,362
13,00	0,204	0,026	3,50	2,415	0,487
12,50	0,230	0,030	3,00	2,902	0,692
12,00	0,260	0,033	2,50	3,595	0,985
11,50	0,293		2,00	4,579	

La correction de température dépend à la fois du coefficient de dilatation du mercure et du coefficient de dilatation de l'échelle sur laquelle sont marquées les divisions. Les coefficients de dilatation étant connus, il est facile de faire des tables de correction.

La table suivante, calculée par M. Silbermann, s'applique au baromètre de Fortin, muni d'une échelle de laiton ; elle s'étend, pour les températures, de 0° à 35°, et pour les pressions, de 650 à 780 millimètres.

Digitized by Google

Table pour réduire à 0 les hauteurs barométriques.

THERMOMÈTRE centésimal.	HAUTEURS BAROMÉTRIQUES EN MILLIMÈTRES.													
	650	660	670	680	690	700	710	720	730	740	750	760	770	780
±0	±0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13
2	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25
3	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35	0,36	0,36	0,37	0,37	0,38	0,38
4	0,42	0,43	0,44	0,44	0,45	0,46	0,46	0,47	0,47	0,48	0,49	0,49	0,50	0,51
5	0,53	0,54	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,38	0,59	0,60	0,61	0,62	0,63	0,63
6	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76
7	0,74	0,75	0,76	0,77	0,78	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,88	0,89
8	0,84	0,86	0,87	0,88	0,90	0,91	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,99	1,00	1,01
9	0,95	0,96	0,98	0,99	1,01	1,02	1,04	1,05	1,07	1,08	1,10	1,11	1,13	1,14
10	1,06	1,07	1,09	1,10	1,12	1,14	1,15	1,17	1,19	1,20	1,22	1,23	1,25	1,27
11	1,17	1,18	1,20	1,21	1,23	1,25	1,27	1,29	1,30	1,32	1,34	1,36	1,38	1,39
12	1,27	1,29	1,31	1,32	1,34	1,36	1,38	1,40	1,42	1,44	1,46	1,48	1,50	1,52
13	1,38	1,39	1,41	1,43	1,46	1,48	1,51	1,52	1,54	1,56	1,58	1,60	1,63	1,65
14	1,48	1,50	1,52	1,54	1,57	1,59	1,61	1,64	1,66	1,68	1,71	1,73	1,75	1,77
15	1,59	1,61	1,63	1,66	1,68	1,71	1,73	1,75	1,78	1,80	1,83	1,85	1,88	1,90
16	1,69	1,72	1,73	1,77	1,79	1,82	1,84	1,87	1,90	1,92	1,95	1,97	2,00	2,03
17	1,79	1,82	1,86	1,88	1,91	1,93	1,96	1,99	2,02	2,04	2,07	2,10	2,13	2,15
18	1,90	1,93	1,97	1,99	2,02	2,05	2,08	2,10	2,13	2,16	2,19	2,22	2,25	2,28
19	2,01	2,04	2,08	2,10	2,13	2,16	2,19	2,22	2,25	2,28	2,31	2.35	2,38	2,41
20	2,11	2,14	2,19	2,21	2,24	2,27	2,31	2,34	2,37	2,40	2,44	2,47	2,50	2,53
21	2,22	2,25	2,29	2,32	2,35	2,39	2,42	2,46	2,49	2,52	2,56	2,59	2,63	2,66
22	2,32	2,36	2,40	2,43	2,47	2,50	2,54	2,57	2,61	2,64	2,68	2,72	2,75	2,79
23	2,43	2,47	2,51	2,54	2,58	2,61	2,65	2,69	2,73	2,76	2,80	2,84	2,88	2,91
24	2,53	2,57	2,62	2,65	2,69	2,73	2,77	2,81	2,85	2,88	2,92	2,96	3,00	3,04
25	2,64	2,68	2,73	2,76	2,80	2,84	2,88	2,92	2,96	3,00	3,04	3,09	3,13	3,17
26	2,74	2,79	2,84	2,87	2,91	2,96	3,00	3,04	3,08	3,12	3,17	3,21	3,25	3,29
27	2,85	2,89	2,95	2,98	3,03	3,07	3,11	3,16	3,20	3,24	3,29	3,33	3,38	3,42
28	2,96	3,00	3,06	3,09	3,14	3,18	3,23	3,27	3,32	3,37	3,42	3,46	3,50	3,55
29	3,06	3,11	3,17	3,20	3,25	3,30	3,34	3,39	3,44	3,49	3,53	3,58	3,63	3,67
30	3,17	3,22	3,27	3,31	3,36	3,41	3,46	3,51	3,56	3,61	3,65	3,70	3,75	3,79
31	3,27	3,32	3,38	3,42	3,47	3,52	3,57	3,62	3,68	3,73	3,78	3,83	3,88	3,92
32	3,38	3,43	3,49	3,53	3,59	3,64	3,69	3,74	3,79	3,85	3,90	3,95	4,00	4,04
33	3,48	3,54	3,60	3,64	3,70	3,75	3,81	3,86	3,91	3,97	4,02	4,07	4,13	4,17
34	3,59	3,64	3,70	3,75	3,81	3,87	3,92	3,98	4,03	4,09	4,14	4,20	4,25	4,30
35	3,69	3,75	3,81	3,86	3,92	3,98	4,05	4,09	4,15	4,21	4,26	4,32	4,38	4,43

Cette table a été calculée en prenant pour la dilatation cubique du mercure le coefficient de Dulong et Petit, 0,00018013, et pour la dilatation linéaire du laiton le coefficient de Lavoisier et de Laplace, 0,00001878. Ainsi, pour chaque degré, il faut de la hauteur observée retrancher cette hauteur multipliée par (0,00018018 — 0,00001878) = 0,0001614. Si la hauteur n'est pas l'un des nombres inscrits en haut de la table, on prend les

parties proportionnelles; il en est de même si la température n'est pas d'un nombre juste de degrés.

287. Des vents. — On a beaucoup écrit sur les vents ; on a même fait beaucoup d'observations sur leur direction, sur leurs changements périodiques ou irréguliers : et cependant nous n'aurons ici que très-peu de chose à dire. C'est un sujet si vaste et si compliqué, qu'il a été impossible jusqu'à présent de déduire quelque loi générale de l'ensemble des observations connues. Il faudrait compulser tous les registres météorologiques, examiner pour un même instant l'état des vents sur tous les points du globe, et discuter les changements simultanés qui surviennent dans les instants successifs. Cette tâche immense sort des bornes d'un ouvrage élémentaire ; si elle avait été remplie, nous en pourrions profiter pour résumer en peu de paroles les faits généraux auxquels elle doit nécessairement conduire.

On a cru remarquer que dans certains lieux les vents se succèdent dans un ordre déterminé ; mais ces observations, beaucoup plus simples en elles-mêmes, puisqu'elles sont plus restreintes, présentent encore trop d'incertitudes pour qu'il nous soit permis de les discuter ici.

Nous nous bornerons à quelques remarques sur la direction des vents et sur les causes générales que l'on peut leur assigner.

Les vents peuvent se propager par *impulsion* et par *aspiration*. Nous désignerons ainsi deux modes opposés qui doivent être soigneusement distingués. Le vent se propage par *impulsion* quand le souffle a lieu dans un sens et la marche progressive dans le même sens ; c'est ce qui arrive au vent qui sort d'un soufflet dans lequel l'air est comprimé. Le vent se propage par *aspiration* quand le souffle a lieu dans un sens, et la marche progressive en sens contraire ; c'est ce qui arrive au vent qui entre dans un soufflet où l'air est raréfié : le souffle a lieu *vers* la buse, et la marche progressive du courant a lieu en sens contraire, car les points les plus éloignés sont ceux qui reçoivent les derniers l'impression.

Ce dernier mode n'est pas aussi rare qu'on le pense ; nous en verrons la preuve dans l'article suivant, en parlant des ouragans ; et Wargentin l'avait aussi remarqué sur les vents, dans le nord de l'Europe. Quand le vent passe à l'ouest, dit-il, il se fait sentir à Moscou plus tôt qu'à Abo, quoique cette dernière ville soit de près de quatre cents lieues plus *occidentale* que

Digitized by Google

Moscou; et il ne parvient en Suède qu'après avoir préalablement soufflé en Finlande.

Entre toutes les causes que l'on assigne aux vents, l'une des plus puissantes est, sans aucun doute, la prompte condensation des vapeurs dans le sein de l'atmosphère. On voit quelquefois tomber 27 millimètres d'eau en une heure sur une grande étendue de pays, particulièrement dans les régions équatoriales. Or, supposons seulement que cette étendue soit de dix lieues de côté, ou de cent lieues carrées. Si la vapeur qui est nécessaire pour produire 27 millimètres sur cent lieues carrées, était dans l'air à l'état élastique, et seulement à 10° de température, elle occuperait un espace cent mille fois plus grand qu'à l'état liquide, c'est-à-dire qu'elle occuperait un espace de cent lieues carrées sur 2 700 000 millimètres, ou 2700 mètres de hauteur. Telles seraient donc les dimensions du vide qui résulterait de cette condensation. A la vérité, la vapeur n'est pas à l'état élastique, elle est à l'état vésiculaire; mais, par cela seul qu'elle reste suspendue dans l'atmosphère, elle a probablement une densité moindre qu'à l'état liquide, et sa condensation en gouttes de pluie produit encore un vide immense qui ne peut se remplir sans exciter une grande secousse atmosphérique.

288. **Des ouragans.** — Dans la zone torride et dans tous les climats à hautes températures, les ouragans sont fréquents, et se déploient avec une violence prodigieuse; dans nos climats tempérés, ils sont à la fois plus rares et moins violents; et, dans les régions polaires, les grandes secousses atmosphériques, qui sont, du reste, assez habituelles, se réduisent, à ce qu'il paraît, à des vents de tempête, ou seulement à des vents très-forts. Les ouragans occupent en général une grande étendue en largeur, et une étendue encore plus grande en longueur. On en pourrait citer qui ont parcouru quatre ou cinq cents lieues avec une intensité presque égale; ils se propagent, comme le vent, par un mouvement de translation dans une direction à peu près constante : ce qui les caractérise, c'est leur vitesse, qui est excessive; elle est quelquefois de plus de vingt lieues à l'heure. Il n'y a point d'agent caché qui soit en jeu dans les ouragans, point de fluide impondérable analogue à l'électricité qui exerce une action directe. Ce n'est, en dernier résultat, que de l'air en mouvement qui agit par sa puissance mécanique; et l'air est si léger, que toute sa puissance semble devoir être extrêmement bornée:

Digitized by Google

mais la force que les molécules d'air n'ont pas par leur masse, elles la prennent par leur vitesse, et elles deviennent ainsi capables de produire des effets qui paraissent d'abord incroyables, et qui sont cependant conformes aux lois de la mécanique.

Pour donner une juste idée de ces effets, nous rapporterons ici quelques-uns des trop fameux désastres causés par l'ouragan qui a dévasté la Guadeloupe le 25 juillet 1825.

Des maisons solidement bâties ont été renversées; un édifice neuf, élevé aux frais de l'État, avec la plus grande solidité, a eu une aile entière complétement rasée.

Le vent avait imprimé aux tuiles une telle vitesse, que plusieurs pénétrèrent dans les magasins à travers des portes épaisses.

Une planche de sapin d'*un mètre* de long, de *deux décimètres et demi* de large, et de *vingt-trois millimètres* d'épaisseur, se mouvait dans l'air avec une si grande rapidité qu'elle traversa d'outre en outre une tige de palmier de *quarante-cinq centimètres* de diamètre.

Une pièce de bois de *vingt centimètres d'équarrissage*, et de *quatre à cinq mètres* de long, projetée par le vent sur un chemin ferré, battu et fréquenté, entra dans le sol de *près d'un mètre.*

Une belle grille en fer, établie devant le palais du gouverneur, fut entièrement rompue.

Trois canons de 24 se déplacèrent jusqu'à la rencontre de l'épaulement de la batterie qui les renfermait.

Pour expliquer ces phénomènes, il n'y a qu'une seule difficulté, celle de savoir comment l'air a pu recevoir dans l'atmosphère une si prodigieuse vitesse; car, cette vitesse étant donnée, les actions mécaniques les plus étonnantes en deviennent les conséquences nécessaires. C'est du gaz en mouvement qui pousse le boulet hors du canon, et c'est aussi du gaz en mouvement qui lance dans les airs des quartiers de rocher, lorsqu'une mine fait son explosion.

Direction des ouragans. — Les ouragans peuvent, comme le vent, se propager par *impulsion* ou par *aspiration*. Ce second mode mérite attention, parce qu'il fournit une donnée importante sur la cause du mouvement. C'est Franklin qui paraît en avoir, le premier, fait l'observation. Il rapporte quelque part, dans ses lettres, qu'ayant voulu observer une éclipse de lune à Philadelphie, il en fut empêché par un ouragan de *nord-est*, qui se manifesta sur les sept heures du soir, et amena, comme

Digitized by Google

d'ordinaire, des nuages épais qui couvrirent tout le ciel. Il fut surpris, quelques jours après, d'apprendre qu'à Boston, situé environ à quatre cents milles au *nord-est* de Philadelphie, la tempête n'avait commencé qu'à onze heures du soir, longtemps après l'observation des premières phases de l'éclipse; et, comparant ensemble les rapports recueillis dans diverses colonies, Franklin observa constamment que cette tempête du nord-est avait eu lieu d'autant plus tard, que la station était plus *septentrionale*, et qu'ainsi *le vent soufflait dans un sens, et avançait progressivement en sens contraire.*

Depuis, l'on a observé un grand nombre d'ouragans présentant ce caractère particulier dans leurs directions.

289. Des trombes. — Le phénomène des trombes est en même temps le plus extraordinaire des phénomènes météorologiques dans les effets qu'il produit, et le plus incompréhensible dans ses causes. Pour en donner une juste idée, nous rapporterons textuellement la description d'une trombe qui a été observée dans les environs de Trèves en 1829, par le professeur Grossmann.

« Vers deux heures de l'après-midi, une lieue au-dessous de Trèves, à l'est-nord-est de Ruwer et de Pfalzel, à environ 20° au-dessus de l'horizon, un phénomène se montra, qui frappa d'étonnement, et mit, pendant une demi-heure, dans une attente inquiète, un grand nombre d'hommes qui étaient occupés au dehors.

« Le ciel, à la suite de la pluie qui venait d'avoir lieu, était encore couvert, lorsque tout à coup, du milieu d'un nuage noir qui s'élevait de l'est-nord-est, une masse lumineuse commença à se mouvoir en sens contraire, et à le déchirer violemment. Le nuage prit bientôt, vers le haut, la forme d'une cheminée, de laquelle se serait échappée une fumée d'un gris blanchâtre, assez mélangée par intervalles de jets de flamme, et s'élevant par plusieurs ouvertures avec autant de force (ainsi s'exprimèrent un certain nombre de témoins) que si elle avait été chassée avec la plus grande vivacité par plusieurs soufflets.

« Le météore était arrivé au-dessus des vignes de Disburg, et vis-à-vis de Ruwer, lorsqu'à quelque distance plus au sud, sur la rive droite de la Moselle, tout à fait en contact avec le sol, un nouveau météore, comme il sembla à plusieurs individus, apparut d'une manière effrayante ; il dispersa des masses de

charbon de terre entassées autour d'un arbre, renversa un ouvrier d'un four à chaux qui se trouvait là, et se précipita à travers la Moselle avec un fracas épouvantable, comme si un grand nombre de pierres se heurtaient ensemble. L'eau s'élança en une haute colonne.

« Roulant avec le même fracas, ce dernier météore, toujours à terre, se dirigea de la Moselle à travers les campagnes de Pfalzel, laissant des traces évidentes de sa route en zigzag à travers les champs de blé et de légumes. Une partie des légumes fut entièrement détruite, un autre partie couchée et hachée, le reste enlevé au loin dans les airs.

« Plusieurs femmes, près desquelles passa le météore, s'évanouirent; d'autres, plus éloignées, se cachèrent, ou s'enfuirent en criant : « Tous les champs sont en feu. » Deux ouvriers, qui étaient montés sur un arbre, observèrent le météore dans tout son trajet; un autre eut même la pensée courageuse de le suivre, et cela était facile, en marchant d'un pas ordinaire. Mais, dans un des zigzags qu'il décrivait, le météore l'enveloppa tout à coup. Il se sentit tantôt tiré en avant, tantôt violemment soulevé; il se pencha, en s'appuyant fortement à terre avec ses outils; mais il n'en fut pas moins jeté à la renverse. Le tourbillon pourtant l'abandonna et continua sa route.

« Il ne se souvient d'aucune impression particulière qui aurait affecté soit l'odorat, soit le goût, mais seulement d'un bruit assourdissant. Il affirme qu'il y avait deux courants, dont l'un s'élevait obliquement, entraînant les tiges et les épis avec d'autres corps légers; l'autre avait une direction contraire.

« La route que le météore s'était frayée à travers les champs avait, suivant différents rapports, de 10 à 18 pas de largeur, sur une longueur de 2100 pas. Sa forme était à peu près conique; sa couleur, tantôt grise, blanche ou jaune, tantôt brun obscur, le plus souvent celle du feu. Le premier météore était en l'air, au-dessus de celui-ci, à peu près parallèle, en avant vers le nord; il présenta, pendant environ dix-huit minutes, une grande masse d'un gris blanchâtre, qui semblait souvent vomir de la fumée rouge de flamme, et qui, vue à la distance d'environ une demi-lieue, avait la forme d'un serpent de 140 pas de long, dont la tête était vers le nord-nord-est, la queue à l'opposite.

« En huit à dix minutes de temps, la queue s'était changée déjà en s'abaissant; au moment où elle allait toucher la terre,

tout le phénomène disparut, et en même temps aussi le météore inférieur, sans que, ni de la partie élevée en l'air, ni, comme l'assure un témoin oculaire, de la partie inférieure, il y eût aucune explosion; mais alors une odeur de soufre très-puante se répandit sur toute la campagne. Presque aussitôt un orage éclata sur les bois situés au nord-nord-ouest du lieu où s'était montré le météore, et fut accompagné d'une grêle à grains extraordinairement gros.

« Le soleil ne parut point pendant tout ce temps, à ce qu'affirment la plupart des spectateurs. Il n'y avait aucun souffle de vent.

« Le météore supérieur fut aperçu de Gutweiler, Cossel, et autres endroits, comme aussi de Trèves; il paraît être descendu des hauteurs de Hochwald. »

Nous pourrions citer un assez grand nombre d'observations analogues faites sur divers points du globe. (Voy. Météore de Malaunay, *Comptes rendus*, t. XXI, p. 545.) On appelle quelquefois *trombes marines* (Pl. 49, Fig. 11) celles qui paraissent soit en pleine mer, soit près des côtes; *trombes d'eau*, celles qui se montrent au-dessus des lacs et des rivières; puis *trombes d'air*, celles qui parcourent la terre avec plus ou moins de rapidité. Mais, tout ce que l'on a pu recueillir sur ces différentes trombes montre avec évidence qu'elles tiennent aux mêmes causes et qu'elles produisent les mêmes effets : c'est une seule et même puissance, qui tantôt s'exerce sur les eaux, pour en soulever des colonnes qui ont plusieurs centaines de mètres de hauteur; tantôt sur le sol, pour fouiller la terre, briser les arbres et enlever tous ces débris jusqu'aux nuages.

Comment cette puissance, quelquefois si prodigieuse, peut-elle prendre naissance au milieu des airs? C'est une question, il faut le dire, à laquelle la science ne peut faire aucune réponse précise.

HYGROMÉTRIE.

290. Construction et usage des hygromètres. — L'hygrométrie a un double but, celui de mesurer la force élastique de la vapeur qui existe dans l'air, et celui de déterminer l'action que les divers corps de la nature peuvent exercer sur cette vapeur. Cette seconde partie offre nécessairement une foule de phénomènes qui ne peuvent être considérés ici que d'une manière gé-

Digitized by Google

nérale ; ainsi nous nous attacherons particulièrement à la première partie, qui présente une question nette et précise.

Tous les instruments qui servent à mesurer la force élastique de la vapeur contenue dans l'air se nomment *hygromètres ;* mais ils reposent sur des principes différents : les uns agissent par condensation, les autres par absorption, les autres enfin par simple évaporation.

Hygromètre de condensation. — Concevons un vase de verre plein d'eau, dans une atmosphère tranquille à 20° : si l'on refroidit l'eau graduellement, à 19°, 18°, etc., il arrive un moment où les parois du vase se troublent et se couvrent de rosée ; alors, la force élastique de la vapeur qui existe dans l'air est connue, car elle est la tension maximum correspondant à la température du *point de rosée.*

En effet, la couche de gaz qui enveloppe les parois extérieures du vase se refroidit comme ces parois elles-mêmes, et, tout en se refroidissant par leur contact, elle conserve son élasticité totale qui est mesurée par la hauteur du baromètre ; mais il y a plus : les deux éléments qui composent cette couche de gaz, savoir l'air et la vapeur, conservent chacun leur élasticité partielle ; or, à l'instant où cette vapeur commence à se condenser, elle a évidemment la force élastique maximum correspondant à la température de condensation. Tel est le principe sur lequel repose la construction des hygromètres de condensation. Tout se réduit à observer exactement la température du point de rosée et à chercher dans la *table* la force élastique correspondante. Nous reproduisons ici cette table en y ajoutant une colonne où se trouve exprimé en grammes le *poids de vapeur contenu dans un mètre cube d'air.*

Tableau des poids de la vapeur qui est contenue dans un mètre cube d'air.

TEMPÉRATURE du point de rosée.	FORCE élastique correspondante.	POIDS de la vapeur.	TEMPÉRATURE du point de rosée.	FORCE élastique correspondante.	POIDS de la vapeur.
	mm.	gr.		mm.	gr.
— 20°	1,3	1,5	19°	16,3	16,2
— 15	1,9	2,1	20	17,3	17,1
— 10	2,6	2,9	21	18,3	18,1
— 5	3,7	4,0	22	19,4	19,1
0	5,0	5,4	23	20,6	20,2
1	5,4	5,7	24	21,8	21,3
2	5,7	6,1	25	23,1	22,5
3	6,1	6,5	26	24,4	23,8
4	6,5	6,9	27	25,9	25,1
5	6,9	7,3	28	27,4	26,4
6	7,4	7,7	29	29,0	27,9
7	7,9	8,2	30	30,6	29,4
8	8,4	8,7	31	32,4	31,0
9	8,9	9,2	32	34,3	32,6
10	9,5	9,7	33	36,2	34,3
11	10,1	10,3	34	38,3	36,2
12	10,7	10,9	35	40,4	38,1
13	11,4	11,6	36	42,7	40,2
14	12,1	12,2	37	45,0	42,2
15	12,8	13,0	38	47,6	44,4
16	13,6	13,7	39	50,1	46,7
17	14,5	14,5	40	53,0	49,2
18	15,4	15,3	»	»	»

Le principe de la condensation se trouve réalisé dans les trois hygromètres suivants :

L'*hygromètre à capsule* se compose d'un thermomètre et d'une petite capsule de plaqué d'or très-mince (Pl. 48, Fig. 15). On verse de l'éther sulfurique dans la capsule ; l'évaporation qui a lieu refroidit à la fois l'éther, la capsule et le thermomètre. On observe la température à l'instant où l'or se ternit, c'est la température du point de rosée ; la force élastique correspondante est écrite sur l'échelle du thermomètre.

L'*hygromètre à virole d'or* (Fig. 16) est moins embarrassant pour les voyages : c'est un simple thermomètre à réservoir cylindrique, mince et allongé, portant au milieu de sa longueur une virole d'or qui joint bien sur le verre ; de chaque côté, le réservoir est couvert de toile fine ; on y verse l'éther, et l'on observe la température à l'instant où l'or se ternit ; le flacon d'éther est contenu dans la boîte du thermomètre.

L'*hygromètre de Daniel* est représenté dans la figure 17. Il se compose d'un tube recourbé, terminé par deux boules : l'une *a*

Digitized by Google

de verre noir, et l'autre *b* de verre ordinaire. La boule noire est à moitié pleine d'éther, et en outre elle contient un très-petit thermomètre, dont la tige et l'échelle sont arrêtées dans l'intérieur du tube *t*; l'air est complétement chassé de l'appareil. On verse de l'éther sulfurique sur la boule *b* qui est revêtue d'une toile fine, et l'on renouvelle l'opération jusqu'au moment où la rosée se dépose sur la boule noire. On note la température précise que marque alors le petit thermomètre intérieur : cette température est celle du point de rosée.

Le refroidissement de la boule noire est produit par la prompte évaporation de l'éther qu'elle contient, évaporation qui est elle-même produite par la condensation de l'éther dans l'intérieur de la boule *b*, de plus en plus refroidie par l'évaporation qui se fait sur sa surface extérieure.

Hygromètres d'absorption. — Il y a un grand nombre de corps qui absorbent, avec plus ou moins d'avidité, la vapeur d'eau contenue dans l'air, et, comme en même temps ils éprouvent quelques changements dans leurs dimensions, dans leur poids ou dans quelques autres de leurs propriétés, l'on a essayé de prendre ces changements eux-mêmes pour la mesure des quantités de vapeur absorbées. On a construit beaucoup d'hygromètres sur ces principes, mais nous n'en décrirons qu'un seul ici, c'est l'*hygromètre à cheveu*, que l'on appelle aussi l'*hygromètre de Saussure*, du nom de son illustre inventeur.

L'*hygromètre à cheveu* est représenté dans la figure 18. Le cheveu est fixé par son extrémité supérieure à une pince *a*, qui peut éprouver de légers déplacements au moyen de la vis *b* et du ressort *c*; il s'enroule par son extrémité inférieure sur une poulie à deux gorges, dont l'axe porte une aiguille *d* destinée à parcourir le cadran *e*. Dans la seconde gorge de la poulie est enroulé un fil de soie portant un petit contre-poids *f* destiné à donner au cheveu une tension continuelle et toujours égale.

Voici maintenant le jeu de l'instrument. Quand l'air qui enveloppe le cheveu devient plus humide, le cheveu absorbe une nouvelle quantité d'humidité, il s'allonge, le contre-poids fait tourner la poulie, et l'aiguille marche vers le point *h* du cadran; au contraire, quand l'air devient plus sec, le cheveu perd une partie de son humidité, il se sèche lui-même, se raccourcit, entraîne le contre-poids, fait tourner la poulie, et l'aiguille marche vers le point *s* du cadran.

Digitized by Google

Les indications que l'on peut tirer de l'hygromètre à cheveu reposent sur les deux principes suivants :

1° Dans la *sécheresse extrême*, le cheveu prend toujours le même degré de raccourcissement, c'est-à-dire que l'aiguille finit toujours par s'arrêter au même point *s* du cadran, quelle que soit la température; ce point *s* est le point de la sécheresse extrême.

2° Dans l'*humidité extrême*, le cheveu prend toujours le même degré d'allongement, c'est-à-dire que l'aiguille finit toujours par s'arrêter au même point *h*, quelle que soit la température; ce point *h* est le point de l'humidité extrême.

Pour le même cheveu, l'intervalle compris entre les points extrêmes *s* et *h* est toujours le même, et le mouvement de la pince supérieure *a* sert à changer un peu la longueur du cheveu, pour amener ces points sur le cadran.

Nous allons en même temps démontrer ces principes par l'expérience, et faire la graduation de l'instrument. On met l'hygromètre sous une cloche; on y fait le vide, ou bien on y laisse l'air; mais, dans l'un ou l'autre cas, on en absorbe toute l'humidité, soit avec l'acide sulfurique concentré, soit avec du chlorure de calcium, et l'on observe le point où s'arrête l'aiguille; ce point est marqué zéro sur le cadran : c'est le point de sécheresse extrême, car l'expérience répétée plusieurs fois à des températures différentes donne très-sensiblement le même résultat. Il faut quelquefois plusieurs jours pour que l'aiguille cesse complétement de marcher au sec.

Ensuite, on porte l'hygromètre sous une cloche dont on a mouillé les parois avec de l'eau distillée; la cloche elle-même repose sur un plateau au fond duquel on a répandu de l'eau, et l'on abandonne l'expérience à elle-même. L'aiguille marche rapidement vers le point *h* ou vers l'humidité, et enfin elle s'arrête : son point d'arrêt est le même, soit que la température ambiante soit 0°, 10°, 20°, 30°; c'est le point de l'humidité extrême. On y marque 100; l'arc compris sur le cadran entre 0 et 100 est ensuite divisé en 100 parties égales, et chacune de ces parties est ce que l'on nomme *un degré d'humidité*.

Les cheveux doivent être soumis d'abord à une lessive alcaline très-légère et à peine tiède; on choisit ensuite ceux qui sont à la fois très-unis et très-homogènes : il arrive souvent qu'après quelques mois, le cheveu est altéré, il cesse de revenir à ses points extrêmes et d'avoir une marche régulière; il faut le renouveler.

Gradué comme nous venons de le dire, l'hygromètre n'est propre qu'à marquer la sécheresse extrême, ou l'humidité extrême, et à montrer que l'air approche plus ou moins de ces limites. Pour tirer de ces indications la force élastique de la vapeur, il y avait à établir les rapports qui existent entre les degrés de l'hygromètre et les forces élastiques elles-mêmes ; c'est ce qui a été fait par Gay-Lussac, et le tableau suivant contient, pour la température de 10°, la tension de la vapeur correspondant à chaque degré de l'hygromètre.

Table hygrométrique construite pour la température de 10 degrés centésimaux d'après les expériences de Gay-Lussac.

DEGRÉS de l'hygromètre à cheveu.	TENSIONS.	DEGRÉS de l'hygromètre à cheveu.	TENSIONS.	DEGRÉS de l'hygromètre à cheveu.	TENSIONS.
0	0,00	34	17,10	68	44,89
1	0,45	35	17,68	69	46,04
2	0,90	36	18,30	70	47,19
3	1,35	37	18,92	71	48,51
4	1,80	38	19,54	72	49,82
5	2,25	39	20,16	73	51,14
6	2,71	40	20,78	74	52,45
7	3,18	41	21,45	75	53,76
8	3,64	42	22,12	76	55,25
9	4,10	43	22,79	77	56,74
10	4,57	44	23,46	78	58,24
11	5,05	45	24,13	79	59,73
12	5,52	46	24,86	80	61,22
13	6,00	47	25,59	81	62,89
14	6,48	48	26,32	82	64,57
15	6,96	49	27,06	83	66,24
16	7,46	50	27,79	84	67,92
17	7,95	51	28,58	85	69,59
18	8,45	52	29,38	86	71,49
19	8,95	53	30,17	87	73,39
20	9,45	54	30,97	88	75,29
21	9,97	55	31,76	89	77,19
22	10,49	56	32,66	90	79,09
23	11,01	57	33,57	91	81,09
24	11,53	58	34,47	92	83,08
25	12,05	59	35,37	93	85,08
26	12,59	60	36,28	94	87,07
27	13,14	61	37,31	95	89,06
28	13,69	62	38,34	96	91,25
29	14,23	63	39,36	97	93,44
30	14,78	64	40,39	98	95,63
31	15,36	65	41,42	99	97,81
32	15,94	66	42,58	100	100,00
33	16,52	67	43,73	»	»

Dans cette table, la force élastique maximum est représentée par 100 : ainsi, lorsqu'à 80° de l'hygromètre on trouve 61,22 dans la table des tensions, il faut, pour avoir la tension en millimètres, multiplier ce nombre par $\frac{9,47}{100}$, 9,47 étant la tension maximum pour 10° ; mais il faudrait le multiplier par $\frac{12,8}{100}$ à 15°, la tension maximum étant alors 12,8.

Toutefois, cette table serait probablement en erreur pour des températures qui s'éloigneraient trop de 10°, parce que les rapports entre les degrés de l'hygromètre et les tensions changent avec la température.

Voici le procédé que Gay-Lussac a employé pour faire cette graduation. Il a pris diverses dissolutions donnant de la vapeur d'eau à diverses tensions pour la même température de 10° ; il a observé les degrés de l'hygromètre dans les vapeurs, et ensuite, par une interpolation, il a conclu les degrés que l'hygromètre aurait marqués dans d'autres vapeurs de tensions intermédiaires, ou *vice versa*. Le tableau suivant indique les dissolutions qui ont été choisies ; leurs tensions avaient été mesurées dans le baromètre comme celles de la vapeur d'eau.

NATURE des DISSOLUTIONS.	DENSITÉS des dissolutions à 10° centésimaux.	TENSION des dissolutions à 10°, celle de l'eau étant représentée par 100.	DEGRÉS de l'hygromètre à cheveu correspondant à la tension de chaque dissolution.
Eau	1000	100,0	100,0
Muriate de soude	1096	90,6	97,7
Id.	1163	82,3	92,2
Id.	1205	75,9	87,4
Muriate de chaux	1274	66,0	82,0
Id.	1343	50,5	71,0
Id.	1397	37,6	61,2
Acide sulfurique	1493	18,1	33,1
Id.	1541	12,2	26,3
Id.	1702	2,1	6,1
Id.	1848	0,0	0,0

Avant de choisir le cheveu, on avait employé une foule de substances organiques : du parchemin, des peaux diversement préparées, des rubans de baleine, etc. ; on avait eu recours aussi au changement de volume ou de capacité ; on avait mis du mer-

Digitized by Google

cure dans des plumes à écrire, dans des vessies de souris, etc., et l'on observait dans un tube étroit les mouvements d'ascension ou de dépression du mercure, suivant que la capacité devenait plus grande par l'humidité ou plus resserrée par la sécheresse. Mais presque toutes ces inventions sont maintenant abandonnées.

Psychromètre. — Le psychromètre imaginé par M. Auguste, de Berlin, mesure l'état hygrométrique de l'air par l'évaporation de l'eau, ou plutôt par le refroidissement qu'elle produit. Cet instrument se compose de deux thermomètres égaux (Fig. 19), dont les réservoirs sont également exposés à l'air; mais l'un reste sec, tandis que l'autre, couvert d'une toile fine, est incessamment humecté : un simple fil de lin, qui va du réservoir à un vase d'eau assez voisin, suffit pour produire cet effet. L'évaporation qui se fait sur le réservoir humide détermine un abaissement de température, d'où l'on peut déduire la force élastique de la vapeur qui existe dans l'air. On pourrait supposer d'abord que ce refroidissement dépend des courants d'air : mais il faut remarquer que, si l'air refroidit la boule humide en lui enlevant de la vapeur, il la réchauffe en la touchant, et M. Auguste a fait voir que les deux causes opposées se balancent, de telle sorte que la différence des températures entre la boule sèche et la boule humide ne dépend pas de la vitesse du vent; ainsi, cette différence dépend uniquement du degré d'humidité de l'air. Ce principe établi, M. Auguste a dressé des tables qui, pour chaque température, indiquée par le thermomètre sec, donnent la force élastique de la vapeur hygrométrique lorsqu'on connaît le refroidissement de la boule humide. Ce nouveau genre d'hygromètre a été employé avec un grand succès par M. de Humboldt et par quelques autres observateurs, et l'on peut présumer qu'il prêtera un grand secours à la science, quand la plupart des constructeurs d'instruments seront parvenus à atteindre, en le construisant, le degré de perfection que l'inventeur, M. Auguste, ne manque jamais de lui donner.

DU SEREIN, DE LA ROSÉE, DU GIVRE ET DE LA GELÉE.

291. Le *serein* est une petite pluie fine qui tombe quelquefois sans que l'on aperçoive aucun nuage au ciel. Dans nos climats, ce phénomène se manifeste seulement pendant l'été, et presque toujours au coucher du soleil; on l'observe surtout dans les

Digitized by Google

vallées ou dans les plaines basses, à une petite distance des lacs et des rivières; il est beaucoup plus rare dans les lieux élevés.

La cause de ce phénomène est très-simple. Supposons, pour un instant, que vers cinq ou six heures de l'après-midi, la température de l'air atmosphérique soit, par exemple, de 20°, et la tension de la vapeur de 13mm : alors, le soleil continuant de s'approcher de l'horizon, la température ambiante s'abaisse de plus en plus, sans que la force élastique de la vapeur éprouve de changement, et, quand la température arrive à 14 ou 15°, la vapeur ne peut plus exister en totalité, puisqu'elle aurait une force élastique plus grande que le *maximum* qui convient à cette température; il faut donc qu'elle se condense en partie : c'est cette condensation qui produit le serein. Ce phénomène n'est très-sensible que dans les grandes chaleurs, parce que c'est alors seulement que l'air peut contenir beaucoup de vapeurs.

Rosée. — Tous les phénomènes de la rosée ne sont que des conséquences des lois de l'hygrométrie et des lois du rayonnement nocturne. C'est le docteur Wells qui a le premier découvert et développé ces conséquences dans une série d'expériences ingénieuses qui remontent à peu près à l'année 1800; son ouvrage sur la rosée fut couronné en 1816 par la Société royale de Londres.

Pendant les nuits calmes et sereines, l'air atmosphérique et tous les corps dispersés sur la surface de la terre se refroidissent par leur rayonnement vers les espaces célestes; mais ils se refroidissent inégalement : l'air conserve mieux sa chaleur, et presque tous les corps deviennent plus froids que lui, les uns de 1°, d'autres de 2°, 3°, d'autres enfin de 10° ou même de 12°.

Nous avons vu que ces divers abaissements au-dessous de la température de l'air ambiant dépendent de trois causes principales, savoir : 1° du pouvoir rayonnant, de la conductibilité et des dimensions des corps eux-mêmes; 2° de l'aspect sous lequel ils peuvent voir le ciel et les objets circonvoisins; 3° de leur position oblique ou inclinée, et de la manière dont ils sont exposés au vent ou aux courants d'air.

Quand il fait un vent plus ou moins fort, toutes ces inégalités disparaissent plus ou moins, parce que l'air ramène les corps à sa température, à mesure qu'ils se refroidissent par le rayonnement; quand le ciel est couvert, elles disparaissent encore, parce

Digitized by Google

que la chaleur diffuse des nuages, diversement absorbée par les différents corps, rend leurs pertes à peu près égales et analogues à celle de l'air.

Ces faits et celui de la condensation de la vapeur, dès qu'elle arrive à son maximum, suffisent pour expliquer tous les phénomènes si divers que présentent la rosée, le givre et la gelée.

Pour la rosée, il suffit maintenant de remarquer que la température de l'air étant par exemple de 15° à une certaine époque de la nuit, il y aura des corps à 14°, d'autres à 13, et les plus rayonnants seront même à 7, à 6 ou à 5°, s'ils se trouvent convenablement placés. Alors, si l'air est très-humide, c'est-à-dire, si le point de rosée est voisin de 15°, presque tous les corps auront de la rosée, les plus chauds en petite quantité et les plus froids en grande proportion; si l'air est moins humide, si le point de rosée est, je suppose, à 10°, les corps qui sont à plus de 10° resteront secs, ceux qui sont à moins de 10° seront plus ou moins couverts de rosée; enfin si l'air est excessivement sec, si le point de rosée est inférieur à 5°, tous les corps resteront secs, aussi bien les plus froids que les plus chauds.

Pour d'autres températures de l'air, soit à une heure plus avancée de la nuit, soit dans une saison différente, le raisonnement est exactement le même.

Le *givre* ou *gelée blanche* n'a pas une autre cause, car c'est de la rosée congelée; il suffit donc qu'à l'instant du lever du soleil, la température de l'air ne dépasse pas 6 ou 7° pour qu'il y ait des corps couverts de givre, si d'ailleurs les conditions qui donnent de la rosée sont remplies, puisqu'alors les corps les plus froids tombant au-dessous de 0, la rosée qui les couvre ne peut manquer de se prendre en glace, ou plutôt en petites aiguilles de neige.

Les *gelées d'automne* et surtout les *gelées de printemps*, qui sont quelquefois si funestes aux récoltes, ont encore la même origine : seulement, l'état de l'humidité de l'air n'exerce alors aucune influence : ce n'est plus la vapeur déposée qui se congèle, c'est l'eau contenue dans les jeunes pousses des plantes, dans les bourgeons, dans les fleurs ou dans les embryons des fruits, qui se gèle elle-même, lorsque ces divers organes délicats, soumis au rayonnement nocturne comme tous les corps dont nous venons de parler, finissent par atteindre une température de $\frac{1}{2}$° ou 1° *au-dessous* de 0, ce qui arrive infailliblement dès

que la température de l'air descend seulement à 3° ou 4° *au-dessus* de 0, le ciel étant serein et l'air calme.

En général l'air n'est pas immobile autour des diverses parties des arbres ou des arbustes, car les couches d'air qu'elles ont refroidies par leur contact glissent comme sur des plans inclinés et sont remplacées par d'autres; ce mouvement tend à les réchauffer, et il est probable que par cette cause elles ne tombent pas à plus de 4 ou 5° au-dessous de la température de l'air.

Il résulte de ces principes que, pour empêcher la gelée dans les circonstances dont nous venons de parler, il suffit d'atténuer les effets du rayonnement, et l'on y parvient en *cachant le ciel* aux plantes qu'on veut protéger, soit en mettant autour d'elles, à une certaine distance, des toiles ou des paillassons, soit en les couvrant avec de simples gazes. Ces moyens, qui sont employés avec tant de succès pour empêcher les gelées locales, ne peuvent rien contre les gelées générales, c'est-à-dire contre celles qui arrivent parce que l'air est lui-même tombé à une température plus basse que 0.

Les effets du rayonnement sont rendus bien sensibles par les procédés qu'on emploie pour faire la glace au Bengale; M. Williams parle de *manufactures* de cette espèce, qui occupent jusqu'à trois cents ouvriers (*Transact. philosoph.*, vol. LXXXIII). Tout l'artifice consiste à choisir un terrain bien découvert et d'une étendue convenable, que l'on divise en petits carrés de 4 ou 5 pieds de côté, entourés d'un petit rebord de terre de 4 à 5 pouces de hauteur. Dans ces compartiments, couverts de paille ordinaire ou de cannes à sucre sèches, on place autant de terrines remplies d'eau qu'ils peuvent en contenir. La glace se produit abondamment quand l'air est calme et le ciel serein; les nuages et le vent empêchent sa formation. M. Williams a reconnu par l'expérience que la température de l'air ambiant est presque toujours de plusieurs degrés au-dessus de 0, et une fois le thermomètre placé sur la paille à côté des terrines, ne descendit pas au-dessous de 5°,6, tandis que la glace se formait rapidement et prenait beaucoup d'épaisseur.

DES BROUILLARDS ET DES NUAGES.

292. Les *brouillards* se forment dans l'air humide quand la force élastique de la vapeur est plus grande que la force élastique

maximum correspondant à la température de l'air. La fumée qui s'élève au-dessus d'un vase rempli d'eau chaude est un véritable brouillard; l'air étant, par exemple, à 20°, et l'eau à 60°, la vapeur se forme avec une force élastique de 144 millimètres, qui est celle qui correspond à 60°; mais comme elle ne peut pas exister avec cette force élastique à une température de 20°, il faut bien qu'elle se condense en partie jusqu'à ce que la force élastique soit réduite à 17 millimètres, qui est celle qui correspond à 20° de température. Le brouillard sera donc d'autant plus intense que la température de l'eau sera plus élevée au-dessus de la température de l'air, et que l'air sera lui-même plus humide, puisque, s'il était saturé, il faudrait que toute la vapeur nouvelle se condensât à mesure qu'elle arrive.

Les brouillards qui se forment sur la mer, les lacs, les fleuves et les rivières, ont précisément la même origine : plusieurs observateurs se sont assurés, par des expériences directes, qu'au moment de leur formation, la température de l'air est toujours moindre que la température de l'eau. Cependant cette condition, qui est toujours nécessaire, n'est pas toujours suffisante : quand l'air est sec et fort agité, il emporte la vapeur et la disperse à l'instant où elle se forme, sans qu'il en résulte une condensation sensible : mais quand l'air est calme et déjà humide, la vapeur s'élève lentement, et se condense presque en totalité; c'est précisément ce qui arrive auprès de toutes les sources pendant l'hiver.

On observe assez souvent des brouillards dans des circonstances qui semblent tout à fait différentes. Par exemple, au moment du dégel, quand la température de l'air est très-sensiblement plus haute que la température de l'eau, on voit encore des brouillards très-intenses se former sur les rivières, même quand elles sont encore couvertes de glaces : mais les apparences seules sont changées, le principe est le même. En effet, dans ce cas, l'air chaud est saturé d'humidité, et, lorsqu'il vient se mêler à l'air qui a été refroidi par le contact de la glace ou par le contact des autres corps froids, sa vapeur se condense.

C'est la même cause encore qui produit les brouillards sur les rivières pendant l'été, après les pluies d'orage. L'air est plus chaud que la surface de l'eau, mais il est saturé d'humidité, et, dès qu'il approche des lieux où la fraîcheur de la rivière se fait sentir, il faut bien que sa vapeur se condense, puisqu'elle se refroidit.

En général, le mélange de deux airs saturés d'humidité et inégalement chauds produit essentiellement du brouillard, parce que la moyenne température qui en résulte est trop basse pour contenir la moyenne force élastique de la vapeur. Par exemple, de l'air saturé d'humidité à 5° se mêle à de l'air saturé d'humidité à 15°; la température moyenne sera 10° : mais la force élastique qui correspond à 5° est 7 millimètres, celle qui correspond à 15° est 13 millimètres; la force élastique moyenne est 10 millimètres, qui ne peut exister dans de l'air à 10°, puisque le maximum de force élastique correspondant à cette température est seulement de 9 millimètres.

Les *nuages* ne sont autre chose que des amas de brouillards plus ou moins épais, suspendus à diverses hauteurs dans l'atmosphère, quelquefois immobiles, et le plus souvent emportés par des courants d'air ou par des vents impétueux. Tous les brouillards qui se forment à la surface de la terre, dans les lieux humides, au fond des vallées, sur les collines, autour des pics élevés ou des cimes neigeuses, deviennent des nuages lorsqu'ils sont entraînés par les vents sans être dispersés. Mais les nuages peuvent avoir aussi une autre origine ; ils peuvent se former directement au milieu des airs, soit par la rencontre de deux vents humides inégalement chauds, soit par la condensation des vapeurs, lorsqu'elles s'élèvent en abondance dans des régions qui sont trop froides pour les contenir à l'état élastique.

On admet, en général, que les vapeurs qui constituent les nuages sont des *vapeurs vésiculaires*, c'est-à-dire des amas de petits globules remplis d'air humide, tout à fait analogues aux bulles de savon. Ces globules se distinguent très-bien à l'œil nu dans les brouillards qui s'élèvent sur l'eau chaude, et particulièrement sur la surface d'une dissolution noire comme le café. Leur densité est essentiellement plus grande que celle de l'air, à cause de la pellicule liquide qui forme leur enveloppe, et il est assez difficile d'expliquer comment ils peuvent, malgré cet excès de densité, rester suspendus au milieu des airs. Gay-Lussac pensait que les courants d'air chaud qui s'élèvent incessamment de la terre pendant le jour ont une grande influence pour déterminer l'ascension et maintenir la suspension des nuages. Fresnel supposait que la chaleur solaire, absorbée dans le sein des nuages, en forme des espèces de montgolfières qui s'élèvent à des hauteurs d'autant plus grandes que l'excès de température

est plus considérable. Ces deux causes sont sans doute très-efficaces; mais nous avons jusqu'à présent trop peu de données sur la véritable constitution des nuages et sur les propriétés des vapeurs ou des éléments divers qui les composent, pour tenter une explication complète de ce phénomène. Nous ne pourrions, à plus forte raison, présenter que des conjectures plus ou moins hasardées sur les causes qui déterminent la forme des nuages, leur étendue, leur élévation, leur couleur et toutes leurs apparences si variées, dont les météorologistes doivent faire une étude particulière.

DE LA PLUIE, DE LA NEIGE, DU VERGLAS, DU GRÉSIL ET DE LA GRÊLE.

293. La quantité de *pluie* qui tombe annuellement sur un même point de la terre est un élément météorologique dont la détermination est très-importante. Les instruments qui servent à cet usage sont appelés *udomètres;* quelques observateurs les nomment *pluviomètres*. La figure 20 représente l'udomètre ordinaire : c'est un cylindre en cuivre de 15 ou 20 centimètres de diamètre; il se compose d'un récipient *a* et d'un réservoir *b*. Le récipient porte un fond conique percé d'une ouverture; il s'ajuste à mouvement de baïonnette sur le réservoir. Au fond de celui-ci s'ouvre un tube coudé *c* qui se relève le long de la paroi extérieure; là il reçoit un tube de verre *d*, qui est divisé en parties égales et qui sert à indiquer la hauteur du liquide intérieur. On mesure exactement la surface du récipient *a*, on jauge le réservoir *b* pour connaître la quantité de liquide qui correspond aux diverses divisions du tube *d*; et il est facile ensuite d'en déduire la *quantité de pluie*, c'est-à-dire l'*épaisseur de la couche* qu'elle aurait formée dans un vase à fond plat et horizontal.

L'udomètre de l'Observatoire de Paris est représenté dans la figure 21. Le récipient est en *a*, le réservoir en *b*; l'eau tombe du récipient dans le réservoir au moyen du tube *d*; un peu au-dessous du réservoir est une cuvette cylindrique, jaugée avec soin, et portant sur sa paroi intérieure des divisions qui indiquent en centimètres la hauteur du liquide. Le récipient a 76 centimètres de diamètre et la cuvette 24 centimètres, de telle sorte que sa surface est la 10ᵉ partie de celle du récipient. On emploie aussi de petits vases gradués pour mesurer les petites

Digitized by Google

fractions. Cet appareil est exposé au milieu de la cour de l'Observatoire ; il est porté sur une petite charpente en chêne, formant une espèce d'armoire, dans laquelle sont renfermés le réservoir, la cuvette et les vases gradués.

Un appareil semblable est disposé au-dessus de la terrasse de l'Observatoire ; son récipient est à 28 mètres au-dessus du récipient de la cour ; il est, comme celui-ci, parfaitement libre et découvert.

Voici le résultat des observations qui ont été faites pendant 22 ans, au moyen de ces deux instruments.

Tableau des quantités de pluie en centimètres qui ont été recueillies à l'Observatoire de Paris de 1817 *à* 1838.

ANNÉES.	Dans la cour.	Sur la terrasse.	ANNÉES.	Dans la cour.	Sur la terrasse.
1817	57	51	1828	63	59
1818	52	43	1829	59	56
1819	59	62	1830	61	57
1820	43	38	1831	61	53
1821	65	58	1832	53	45
1822	48	42	1833	59	50
1823	52	46	1834	46	42
1824	65	57	1835	49	44
1825	52	47	1836	71	61
1826	47	41	1837	52	55
1827	58	50	1838	60	52

La moyenne est, dans la cour, de 57 centimètres, et, sur la terrasse, de 50 centimètres. On a attribué cette différence à diverses causes, mais toutes les raisons qu'on a données laissent encore beaucoup à désirer.

Les observateurs ne doivent pas seulement s'appliquer à déterminer les quantités moyennes de pluie, mais encore à constater les moyennes mensuelles, parce qu'elles ont une influence plus directe sur les récoltes. La différence entre la température de la pluie et celle de l'air est aussi un point qui mérite une attention particulière.

Les pluies très-abondantes ne méritent pas moins d'attention : c'est dans les circonstances qui les accompagnent que l'on peut chercher les véritables causes de la formation de la pluie, et peut-être aussi les principes de la constitution des nuages.

Digitized by Google

Nous citerons ici quelques faits remarquables sur ce sujet :

A Bombay, il est tombé en un seul jour 6 pouces d'eau ou 16 centimètres; à Cayenne, en dix heures de temps, plus de 10 pouces d'eau ou 28 centimètres; à Gênes, par une averse résultant, à ce qu'il paraît, d'une trombe, il est tombé, le 25 octobre 1822, jusqu'à 30 pouces d'eau ou 82 centimètres : c'est l'un des résultats les plus étonnants que l'on puisse citer en ce genre.

On ne sait que très-peu de chose sur la formation de la *neige;* on ne sait pas si les nuages qui la produisent sont composés de vapeurs vésiculaires ou de parcelles déjà glacées; on ne sait pas si les flocons se forment directement, ou s'ils prennent leur accroissement en traversant les couches inférieures de l'air; on n'a pas observé leur température, ni les circonstances qui déterminent leur forme et leur volume.

Les seules observations un peu complètes que l'on possède sur la neige sont relatives aux diverses formes que peuvent affecter les flocons. Le capitaine Scoresby a eu l'occasion de faire, dans les régions polaires, une foule de recherches intéressantes sur ce sujet; son ouvrage contient une centaine de figures diverses, parmi lesquelles nous avons choisi celles qui paraissent les plus remarquables, elles sont représentées dans la planche 48 (Fig. 22).

Képler et beaucoup d'autres physiciens avaient déjà recueilli des observations analogues.

Le *grésil*, que nous avons occasion d'observer dans nos climats, presque toutes les années, pendant les mois de mars et d'avril, a sans doute une origine analogue à celle de la neige. C'est aussi de l'eau congelée, ou plutôt de petites aiguilles de glace pressées et entrelacées, formant une espèce de pelote assez compacte, et quelquefois enveloppée d'une couche de véritable glace transparente. On ne sait rien jusqu'à présent sur les causes qui déterminent ce phénomène.

Le *verglas* est une couche de glace unie, mince et transparente, qui couvre la terre et quelquefois les plantes, les arbres et tous les objets répandus sur le sol. Sa cause est connue : la condition nécessaire à sa production est que l'air soit assez chaud pour donner naissance à de la pluie, et que le sol soit assez froid pour congeler cette pluie à mesure qu'elle tombe. Ainsi, le verglas n'est que de la pluie qui se congèle en touchant le sol.

La *neige rouge* que l'on rencontre dans les régions polaires

et partout où il y a des neiges permanentes, doit sa couleur à la végétation d'un petit champignon (*uredo nivalis*), qui a la propriété de végéter dans la neige, comme M. Baüer l'a démontré par des expériences directes.

La *grêle* est en même temps l'un des fléaux les plus redoutables pour les propriétés agricoles, et l'un des phénomènes les plus embarrassants pour les météorologistes.

Nous essayerons d'abord de rapporter toutes les observations précises qui ont été faites sur la grêle elle-même et sur les circonstances qui l'accompagnent, puis ensuite nous exposerons les hypothèses les moins improbables qui ont été faites pour expliquer sa formation. Nous profiterons d'un article très-intéressant que M. Arago a publié sur ce sujet dans l'*Annuaire du Bureau des Longitudes* pour 1828.

La grosseur la plus ordinaire des grêlons est à peu près celle d'une noisette; il en tombe souvent de plus petits, auxquels on fait peu d'attention, parce que, en général, ils sont peu dangereux; mais il en tombe trop souvent de beaucoup plus volumineux, qui brisent et qui ravagent tout ce qu'ils frappent à la surface de la terre. Nous laisserons de côté les récits des historiens et des chroniqueurs; nous n'admettrons pas avec eux que l'on a vu, sous le règne de Charlemagne, des grêlons de 15 pieds de long sur 6 pieds de large et 11 pieds d'épaisseur, ou que l'on en a vu, sous le règne de Tippo-Saëb, qui étaient gros comme des éléphants : si, chronologiquement, ces exagérations ne remontent pas aux temps fabuleux, on peut bien dire qu'elles y remontent scientifiquement. Mais, tout en restant dans la limite des faits bien observés, nous trouverons encore sur les dimensions de la grêle des résultats assez étonnants. Ceux que nous allons rapporter peuvent être considérés comme tout à fait authentiques; leur exactitude est garantie par des physiciens connus.

Halley rapporte que le 9 avril 1697 il tomba, dans le Fhistshire, des grêlons qui pesaient 5 onces.

Robert Taylor a mesuré, le 4 mai 1697, dans le Hartfordshire, des grêlons dont le contour était de 14 pouces; c'est 4 pouces de diamètre.

Parent a vu, le 15 mai 1703, à Iliers, dans le Perche, des grêlons gros comme le poing.

Montignot ramassa, le 11 juillet 1753, à Toul, des grêlons de 3 pouces de diamètre.

Volta assure que, dans la nuit du 19 au 20 août 1787, parmi les énormes grêlons qui ravagèrent la ville de Côme et ses environs, l'on en trouva qui pesaient 9 onces.

M. Tessier rapporte que le 13 juillet 1788, dans cet orage épouvantable qui traversa la France et les Pays-Bas, il se trouvait des grêlons de 8 onces.

Le docteur Noggerath dit que le 7 mai 1822 il tomba à Bonn des grêlons qui pesaient 12 ou 13 onces.

Ces témoignages sont sans doute suffisants pour établir comme un fait incontestable qu'il est tombé dans différents pays des grêlons pesant plus d'un quart de kilogramme.

La forme des grêlons est très-variable : ils sont en général arrondis, quelquefois aplatis, et dans le nombre on en trouve très-souvent qui sont anguleux, ou qui offrent à leur surface des protubérances ou des saillies remarquables.

Les observations sur la structure intérieure de la grêle sont d'une très-haute importance, parce qu'elles peuvent conduire aux causes qui déterminent les progrès de la congélation ; mais ce qu'elles ont appris jusqu'à présent se réduit aux remarques suivantes :

Vers le centre des grêlons, on trouve en général une espèce de noyau opaque, assez semblable à cette neige plus ou moins spongieuse qui compose le grésil (Fig. 23, n^os^ 1 et 4).

Autour du noyau, on ne distingue ordinairement qu'une masse congelée plus ou moins épaisse et très-sensiblement diaphane.

Quelquefois, on reconnaît dans cette masse des couches distinctes, et pourtant transparentes (n^os^ 1 et 4). D'autres fois, on peut y compter plusieurs alternatives de couches diaphanes et opaques (n^os^ 2, 3 et 6) : cette circonstance mérite toute l'attention des observateurs.

Enfin, l'on trouve des grêlons qui ont une structure *rayonnante* à partir du centre (n° 5), et quelquefois cette structure remarquable enveloppe la structure intérieure, qui est visiblement concentrique. C'est à M. Delcros que l'on doit cette observation intéressante ; il eut occasion de la faire, le 4 juillet 1819, dans un orage de nuit qui répandit la désolation sur plusieurs départements de l'ouest de la France.

Le docteur Eversman rapporte qu'en 1825, dans un orage terrible qui couvrit Ordenbourg et ses environs, on recueillit plu-

Digitized by Google

sieurs grêlons dont le centre ou le noyau était une espèce de pyrite de forme quadrangulaire.

Il m'a semblé depuis longtemps qu'il serait très-important de déterminer la température de la grêle à l'instant où elle tombe. J'ai eu occasion de faire seulement deux observations de cette espèce, avant 1829, qui m'ont donné une température comprise entre 3 et 4° au-dessous de zéro. Depuis, j'ai fait d'autres observations qui m'ont donné — $\frac{1}{2}$°, — 1°, et — 3° : cette dernière appartient aux grêlons gros comme des noix, qui ont ravagé le département de Seine-et-Oise pendant l'été de 1839.

Après ces remarques sur les dimensions, la forme et la structure des grêlons, nous allons rapporter ce que l'on sait des diverses circonstances qui accompagnent ou qui précèdent la chute du fléau.

La grêle précède ordinairement les pluies d'orage ; elle les accompagne quelquefois ; jamais, ou presque jamais, elle ne les suit, surtout quand ces pluies ont quelque durée.

Elle tombe toujours pendant très-peu de temps, souvent pendant quelques minutes, rarement pendant un quart d'heure.

La quantité de glace qui tombe des nuages en si peu de temps est prodigieuse ; la terre en est quelquefois couverte d'une couche de quelques décimètres d'épaisseur.

Nous ne dirons rien ici des désastres qu'elle cause : c'est comme une mitraille qui tombe du ciel ; elle agit par son poids et par l'impulsion qu'elle a reçue du vent, car il paraît bien certain qu'elle ne reçoit aucune impulsion étrangère. On peut juger des désastres que produisent sur la terre des grêlons de 200 ou 300 grammes, ou du moins d'une centaine de grammes, animés d'une vitesse qui peut être presque aussi grande que la vitesse du vent.

La grêle tombe, à ce qu'il paraît, plus ordinairement pendant le jour que pendant la nuit.

Les nuages qui la portent semblent avoir beaucoup d'étendue et beaucoup de profondeur, car ils répandent, en général, une grande obscurité ; on croit avoir remarqué qu'ils ont une couleur particulière, grise ou roussâtre, et qu'en même temps leur surface inférieure présente d'énormes protubérances, et leur bord des déchirures multipliées.

Plusieurs observateurs pensent que ces nuages sont, en général, très-peu élevés ; mais les raisons qu'ils en donnent ne me

semblent pas décisives. Souvent les habitants des hautes collines voient au-dessous d'eux les nuages qui couvrent de grêle le fond des vallées : dans ce cas, il n'y a nul doute, les nuages sont peu élevés, on a même ainsi une mesure exacte de leur hauteur : mais, dans d'autres cas, il me semble difficile de juger de leur position, comme on le fait quelquefois par le temps qui s'écoule entre l'apparition de l'éclair et l'arrivée du bruit du tonnerre ; car l'explosion peut avoir lieu au-dessous des nuages qui portent la grêle, et même on peut dire que cela arrive très-souvent, à cause de ces petits *nuages messagers* qu'on observe presque toujours au moment de l'orage, et qui passent avec une grande rapidité sous les nuages principaux.

S'il y a de l'incertitude sur ce point, il ne paraît pas qu'il y en ait sur un autre phénomène qui *précède* la chute de la grêle de quelques instants, et quelquefois même de plusieurs minutes : c'est un *bruissement* particulier que l'on entend dans les airs, et que l'on compare au bruit que feraient des sacs de noix qui seraient vivement et violemment entre-choqués.

Enfin, la grêle est *toujours* accompagnée de phénomènes électriques : tantôt le tonnerre se fait entendre avant le bruissement dont nous venons de parler, tantôt il se fait entendre en même temps, ou même pendant que les grêlons dévastent la terre par leur chute précipitée.

Pour donner maintenant une idée de l'étendue du ciel et de la terre que ce terrible fléau peut occuper, et de la vitesse avec laquelle il peut se propager, nous rapporterons ici quelques détails sur le fameux orage qui a traversé la France et la Hollande le 13 juillet 1788. Cet orage est sans doute le plus désastreux, le plus effrayant qui ait jamais été vu dans nos climats ; et c'est peut-être aussi celui qui a été le mieux observé (*Mémoire de l'Académie des sciences*, 1790, page 263.)

L'orage s'est propagé *simultanément* sur deux bandes à peu près parallèles, l'une orientale et l'autre occidentale.

La première est sa plus étroite : sa plus grande largeur est de cinq lieues, sa plus petite d'une demi-lieue, sa largeur moyenne de deux lieues et un quart.

La seconde est la plus large : sa plus grande largeur est de cinq lieues, sa plus petite de trois lieues, et sa largeur moyenne de quatre lieues.

Elles étaient séparées par une bande qui reçut seulement une

pluie abondante : sa plus grande largeur était de sept lieues et demie, sa plus petite de trois lieues, et sa largeur moyenne de cinq lieues et un quart.

A l'orient de la bande orientale et à l'occident de la bande occidentale, il y eut aussi beaucoup de pluie, mais dans une largeur qui n'a pas été déterminée.

Ces bandes sont un peu ondulées, mais leur direction générale court du sud-ouest au nord-est. Une ligne droite tirée d'Amboise à Malines forme à peu près le milieu de la bande orientale, et une autre ligne droite tirée de l'embouchure de l'Indre dans la Loire jusqu'à Gand forme à peu près le milieu de la bande occidentale.

Sur cette longueur, qui est de plus de cent lieues pour chaque bande, il n'y eut aucune interruption dans l'orage; et même, d'après des renseignements précis, on peut conclure qu'il couvrit encore plus de cinquante lieues au sud et cinquante lieues au nord, ce qui donne à chaque bande une longueur totale de plus de deux cents lieues, ou environ 1000 kilomètres.

Dans cette immense étendue, tous les points ne furent pas frappés à la fois; mais on reconnut, par la comparaison des heures, que l'orage avait une marche très-rapide depuis les Pyrénées, où il semble avoir pris naissance, jusque dans la Baltique, où l'on en perdit la trace.

Sa vitesse était de seize lieues et demie à l'heure sur les deux bandes, mais la bande orientale avait un peu d'avance sur la bande occidentale.

Dans chaque lieu, la grêle ne tomba que pendant sept ou huit minutes.

Les grêlons n'avaient pas tous la même forme : les uns étaient ronds, les autres longs et armés de pointes; les plus gros pesaient 8 onces.

Le nombre des paroisses dévastées fut en France de *mille trente-neuf;* le dommage qu'elles éprouvèrent fut, par une enquête officielle, évalué à 24 690 000 francs.

Ce phénomène est, parmi tous les phénomènes connus, l'exemple le plus prodigieux, et des puissances qui agissent pour rassembler la vapeur d'eau et pour la maintenir suspendue dans les airs, et des puissances qui agissent pour produire au milieu des chaleurs de l'été un refroidissement subit dans diverses régions de l'atmosphère.

Digitized by Google

Après avoir fait connaître ce que l'on sait des effets de la grêle et de leur intensité, nous essayerons maintenant de présenter, en peu de mots, les opinions qui ont été émises sur leurs causes. Pour expliquer la grêle, il n'y a que deux difficultés, mais elles sont grandes, et, nous pouvons le dire d'avance, elles restent au-dessus de tous les efforts qui ont été faits pour les résoudre.

Il s'agit de savoir d'abord comment se produit le froid qui congèle l'eau, et ensuite comment un grêlon qui a acquis assez de volume pour tomber par son poids, reste encore suspendu dans les airs pendant tout le temps qu'il lui faut encore pour arriver à un volume de 20 ou 30 centimètres de circonférence.

Sur la première question, Volta avait pensé que les rayons solaires, en frappant la surface supérieure d'un nuage très-dense, sont absorbés presque en totalité, qu'il en résulte une très-rapide évaporation, et que c'est cette évaporation qui produit assez de froid pour congeler l'eau. Mais l'on pouvait dire, et c'est, je crois, M. Bellani qui l'a dit le premier, on pouvait dire que quand un liquide s'évapore par la chaleur, soit par la chaleur reçue au contact, soit par la chaleur rayonnante, son évaporation ne peut devenir plus rapide qu'à la condition que sa température devienne plus haute, ou, en d'autres termes, qu'un liquide ne peut pas à la fois recevoir plus de chaleur, et par cette chaleur elle-même se refroidir davantage, sans qu'il intervienne une autre cause.

On a dit ensuite, mais très-vaguement, que le froid est produit par le vent. Cette idée mérite considération. Nous avons vu qu'il y a en effet des vents qui sont toujours accompagnés d'un refroidissement plus ou moins grand : ce sont ceux que nous avons caractérisés en les appelant *vents d'aspiration*. Le fait prouve qu'ils peuvent produire sur la terre un abaissement de 17°, et il n'y a aucun doute que dans les régions élevées ils ne puissent produire un refroidissement plus grand. Les météorologistes doivent donc porter leur attention sur ce point, afin de constater si les vents qui portent les nuées de grêle sont ou ne sont pas des vents d'aspiration. Si le froid qui porte les grêlons n'a pas cette origine, la difficulté reste entière : il faut chercher d'autres voies pour la résoudre.

Sur la seconde question, Volta avait proposé une théorie qui a une grande célébrité, et qui est en effet très-ingénieuse. En

admettant que les noyaux des grêlons soient formés, et qu'il existe un froid suffisant pour les grossir, Volta suppose que deux vastes nuages chargés d'électricités contraires soient disposés l'un au-dessus de l'autre; alors les grêlons, encore très-petits, tombant sur le nuage inférieur, y éprouveront deux effets: 1° en pénétrant à une certaine profondeur, ils se couvriront d'une nouvelle couche de glace, parce que la température est très-basse; 2° ils s'électriseront de l'électricité même du nuage, et seront *repoussés* par lui en même temps qu'ils seront *attirés* par le nuage supérieur. Ainsi remontant contre leur propre poids, ils arriveront au nuage supérieur, où ils éprouveront deux effets analogues; puis, retombant de nouveau dans le nuage inférieur, ils seront de nouveau repoussés dans le nuage supérieur, et pourront ainsi *faire la navette* un très-grand nombre de fois, exactement comme le représente l'expérience que nous avons rapportée (Fig. 18, Pl. 17). Mais bientôt, soit que les grêlons deviennent trop lourds, soit que les nuages perdent leur électricité, ou se trouvent emportés par le vent à des distances trop grandes, la cause qui maintient la grêle suspendue au milieu des airs sera insuffisante, et on la verra tomber instantanément presque en masse.

Volta essayait même d'indiquer les causes qui peuvent déterminer la formation de deux nuages superposés et chargés des électricités contraires; il la trouvait : 1° dans la propriété qu'il attribuait aux rayons solaires de déterminer une prompte évaporation; 2° dans la propriété qu'il attribuait aux vapeurs de s'électriser négativement en se formant, et positivement en se condensant. D'après ces hypothèses, il concevait qu'au-dessus d'un gros nuage frappé par le soleil, s'élève une colonne de vapeur élastique chargée de la même électricité que le nuage, et que cette vapeur, une fois arrivée à une région assez haute, et par conséquent assez froide pour se condenser, se condense en effet pour former un nouveau nuage chargé d'électricités contraires. Ces hypothèses sont inadmissibles : mais, comme il est constant, par le fait, que les nuages orageux sont tantôt positifs et tantôt négatifs, et comme le mouvement de *va-et-vient* des grêlons repose seulement sur ce fait, il reste à examiner s'il est possible en lui-même. Or, on a fait beaucoup d'objections contre cette possibilité : plusieurs sont mal fondées, mais les deux suivantes me semblent d'un grand poids :

Digitized by Google

1° Comment se peut-il qu'une puissance électrique qui n'exerce point son action d'une manière *brusque et instantanée* soit capable d'enlever un bloc de glace de 200 ou 300 grammes? Comment se fait-il que l'étincelle ne parte pas entre ce bloc et le nuage? Tout semble indiquer qu'il faudrait pour cela des propriétés électriques différentes des propriétés connues.

2° Si les deux nuages superposés sont fortement électrisés comme ils doivent l'être pour enlever des masses pesantes, et si les grêlons font la navette dans l'espace qui les sépare, comment se fait-il que l'électricité ne s'écoule pas subitement d'un nuage sur l'autre? Les grêlons ne forment-ils pas entre les nuages une espèce de communication qui favorise à un haut degré l'explosion de l'éclair, comme on le voit dans l'expérience elle-même que l'on fait pour imiter la grêle avec des balles de sureau?

Si ces objections ne détruisent pas la théorie de Volta, elles peuvent du moins la mettre en doute, et prévenir les observateurs qu'il y a encore quelque chose à chercher pour avoir sur ce point toute la vérité.

A côté de la théorie de Volta s'en présente une autre : on peut supposer que le refroidissement étant produit par le vent, c'est aussi la puissance du vent qui entraîne les grêlons horizontalement ou au moins très-obliquement dans l'atmosphère, qu'ils parcourent ainsi quinze ou vingt lieues, et qu'ils n'ont pas besoin d'être suspendus bien longtemps au milieu des nuages très-denses et très-refroidis, pour atteindre le volume énorme qu'ils ont quelquefois. Ainsi, ce serait une même cause qui déterminerait la formation et l'accroissement de la grêle. Quant à l'électricié qui accompagne toujours ce phénomène, elle serait un effet et non pas une cause : il est impossible que l'accumulation de vapeur qui est nécessaire pour engendrer la grêle, puisse se faire sans un grand dégagement d'électricité, puisque tous les nuages qui viennent se condenser au foyer même où se forme la grêle, y viennent avec une électricité positive ou négative qui acquiert une grande tension par la condensation.

On voit donc, en dernier résultat, que le phénomène de la grêle est encore enveloppé d'une grande obscurité, et qu'il faut encore de bonnes et nombreuses observations pour l'expliquer dans tous ses détails.

Pluies de sang, pluies de cendres, etc. — Pour donner une

idée des circonstances qui accompagnent quelquefois ces météores, nous choisirons comme exemple la pluie rouge qui est tombée le 14 mars 1813 dans le royaume de Naples et dans les deux Calabres. M. Sementini a rendu compte de ce phénomène de la manière suivante :

« Le 14 mars 1813, par un vent d'est qui soufflait depuis deux jours, les habitants de Gérace aperçurent une nuée dense s'avancer de la mer sur le continent. A deux heures après midi, le vent se calma ; mais la nuée couvrait déjà les montagnes voisines, et commençait à intercepter la lumière du soleil ; sa couleur, d'abord d'un rouge pâle, devint ensuite d'un rouge de feu. La ville fut alors plongée dans des ténèbres si épaisses, que, vers les quatre heures, on fut obligé d'allumer des chandelles dans l'intérieur des maisons. Le peuple, effrayé et par l'obscurité et par la couleur de la nuée, courut en foule dans la cathédrale faire des prières publiques. L'obscurité alla toujours en augmentant, et tout le ciel parut de la couleur du fer rouge ; le tonnerre commença à gronder, et la mer, quoique éloignée de six milles de la ville, augmentait l'épouvante par ses mugissements ; alors commencèrent à tomber de grosses gouttes de pluie rougeâtres, que quelques-uns regardaient comme des gouttes de sang, et d'autres comme des gouttes de feu. Enfin, aux approches de la nuit, l'air commença à s'éclaircir, la foudre et le tonnerre cessèrent, et le peuple rentra dans sa tranquillité ordinaire.

« Sans commotions populaires, et avec quelques différences en plus ou en moins, le même phénomène d'une pluie de poussière rouge eut lieu non-seulement dans les deux Calabres, mais encore dans l'extrémité opposée des Abruzzes.

« Cette poussière a une couleur d'un jaune de cannelle et une saveur terreuse peu marquée ; elle est onctueuse au toucher, tant est grande sa ténuité, quoiqu'on y découvre à la loupe de petits corps durs ressemblant au pyroxène, mais qui sont étrangers à la poussière, et qui s'y sont accidentellement mêlés, lorsqu'on l'a recueillie sur le terrain. La chaleur la brunit, puis la rend tout à fait noire, et enfin la rougit si elle devient plus intense. Après l'action de la chaleur, elle laisse apercevoir, même à l'œil nu, une multitude de petites lames brillantes qui sont du mica jaune : elle ne fait plus alors effervescence avec les acides, et a perdu environ un dixième de son poids. Sa pesanteur spéci-

fique, lorsqu'elle a été privée de corps durs, est de 2,07; elle est composée de : silice, 33,0; alumine, 15,5; chaux, 11,5; chrôme, 1,0; fer, 14,5; acide carbonique, 9,0. La perte est due à une substance résineuse, de couleur jaunâtre, que l'on obtient en traitant la poudre par l'alcool et en faisant évaporer à siccité, le poids du résidu correspondant à très-peu près à la perte éprouvée dans l'analyse. Cette matière résineuse donne à la poudre la propriété de déflagrer avec le nitre. » (*Giorn. di Fisica, etc., decade seconda*, I, 28.)

CHAPITRE III.

De la lumière météorique.

Les phénomènes météorologiques qui appartiennent à la lumière sont trop nombreux et trop variés pour que nous puissions les développer en détail dans ces essais. Nous nous occuperons seulement de ceux dont la théorie semble assez complète.

MIRAGE.

294. Mirage observé en Égypte. — Lorsqu'on regarde des objets éloignés, il arrive souvent, dans certaines circonstances, que ces objets donnent plusieurs images droites, obliques ou renversées, et toujours plus ou moins altérées dans leurs contours. C'est l'apparence de ces images, sans réflecteur visible pour les produire, qui constitue les phénomènes du *mirage*.

Nous donnerons d'abord la description de ces phénomènes tels qu'ils se présentent dans les plaines de l'Égypte.

Le sol de la basse Égypte forme une vaste plaine, sur laquelle se répandent les eaux du Nil au temps de l'inondation. Sur les bords du fleuve, et jusqu'à une grande distance vers les déserts, soit à l'orient, soit à l'occident, on aperçoit de loin en loin de petites éminences sur lesquelles s'élèvent les édifices ou les villages. Dans les temps ordinaires, l'air est calme et très-pur : au lever du soleil, les objets éloignés se distinguent avec une netteté parfaite; l'observateur peut embrasser alors un vaste horizon, qui n'a rien de monotone, malgré son uniformité; mais, quand la chaleur du jour se fait sentir, quand la terre est échauffée par le soleil, les couches inférieures de l'air participent à la haute température du sol, de nombreux courants s'établissent avec plus ou moins de régularité; il en résulte dans l'air une espèce de tremblement ondulatoire très-sensible à l'œil, et tous les objets éloignés ne donnent plus que des images mal définies, qui semblent se briser et se recomposer à chaque instant. Ce phénomène, qui s'observe aussi dans nos climats pendant les chaleurs de l'été, n'est pas encore le phénomène du mirage. Si

Digitized by Google

le vent ne souffle pas, et si les couches d'air, qui reposent sur la plaine, restent parfaitement immobiles pendant qu'elles s'échauffent au contact de la terre, alors le phénomène du mirage se développe dans toute sa magnificence; l'observateur qui regarde au loin distingue encore l'image directe des éminences, des villages, et de tous les objets un peu élevés : mais, au-dessous de ces objets, il voit leur image renversée, et cesse, par conséquent, de voir le sol lui-même sur lequel ils reposent. Ainsi, tous les objets élevés paraissent comme s'ils étaient au milieu d'un lac immense, et l'aspect du ciel vient compléter cette illusion, car on le voit aussi comme on le verrait par réflexion sur la surface d'une eau tranquille. A mesure que l'on avance, on découvre le sol et la terre brûlante au même lieu où l'on croyait voir l'image du ciel ou de quelque autre objet; puis, au loin, devant soi, l'on retrouve encore le même tableau sous un autre aspect. Ce phénomène a été souvent observé pendant l'expédition de l'armée française en Égypte. C'était un spectacle bien nouveau pour nos soldats, et en même temps une illusion bien cruelle. Quand ils voyaient au loin, sur les plaines brûlantes, le reflet du ciel, l'image renversée des maisons, des palmiers et de tous les objets de l'horizon, ils ne pouvaient douter que toutes ces images ne fussent réfléchies à quelque distance sur la surface d'un lac. Fatigués par des marches forcées, sous l'ardeur du soleil, dans un air chargé de sable, ils couraient au rivage; mais ce rivage fuyait devant eux : c'était l'air échauffé de la plaine qui prenait l'apparence de l'eau, et qui donnait cette image réfléchie du ciel et de tous les objets élevés de la terre. Témoins de ce phénomène, les savants de l'expédition eurent, comme toute l'armée, un instant d'illusion, mais cet instant fut court : Monge en découvrit sur-le-champ la cause, et en développa toutes les circonstances. C'est, comme nous allons le voir, un jeu particulier de la réfraction.

295. Explication du mirage. — Supposons que *ab* représente la surface horizontale du sol (Pl. 49, Fig. 2), l'expérience prouve que, par l'effet de la chaleur, les couches inférieures de l'air peuvent prendre une densité croissante à mesure que l'on s'élève, qu'à une certaine hauteur cette densité devient à peu près constante, puis, qu'elle décroît ensuite, conformément aux lois ordinaires de la constitution de l'atmosphère. Cela posé, concevons un point élevé *h*, et examinons comment sa lumière doit

être modifiée pour arriver à l'œil que nous supposons placé en *p*. Il est évident d'abord que l'œil verra une image directe du point *h*, par les rayons voisins de *ph* : ces rayons, il est vrai, ne viendront pas en lignes absolument droites, puisque, entre *p* et *h* l'air n'a pas absolument la même densité; mais ils ne pourront éprouver que de légères inflexions, et il en résultera seulement une certaine irrégularité dans les contours de l'image.

Mais, parmi les rayons que le point *h* envoie dans tous les sens, il s'en trouvera qui suivront la route *hiklmnop*, et qui donneront, par conséquent, dans la direction *poz*, une image renversée de l'objet, comme s'il y avait réflexion sur un miroir. En effet, le rayon *hi*, par exemple, arrivant obliquement pour pénétrer dans la couche c', qui est *moins réfringente* que la couche *c* dans laquelle il se trouve, doit se réfracter en *s'écartant* de la normale. Par la même raison, il doit s'écarter aussi de la normale en passant de la couche c' dans la couche c'', et s'en écarter encore en passant de celle-ci dans la suivante. Ainsi, l'obliquité augmentant sans cesse, il pourra bien arriver qu'à la fin le rayon ne puisse plus passer du milieu réfringent où il est dans le milieu moins réfringent auquel il se présente; alors, il sera forcé de se réfléchir, et, continuant sa route vers l'œil, il arrivera dans la direction *mnop;* l'œil verra donc le point *h* dans la direction *poz*, et dans une position à peu près symétrique du point *h* par rapport au plan *mv*, sur lequel est censée se faire la réflexion.

La marche du rayon est ici tracée en ligne brisée; mais comme la densité va croissant par degrés insensibles depuis la surface, on conçoit que le rayon se dévie aussi par degrés insensibles, et qu'il suive une ligne courbe, et non une ligne brisée.

Tel est le principe de l'explication du mirage donnée par Monge en présence même du phénomène; elle a été publiée dans les Mémoires de l'Institut d'Égypte.

Voici une expérience qui n'imite le mirage que bien faiblement, mais qui peut servir cependant à en faire comprendre l'explication.

cc' (Fig. 1) est une caisse de tôle, ayant environ 1 mètre de longueur sur 15 ou 18 centimètres, tant en largeur qu'en hauteur : on la remplit de charbon allumé, on la suspend à la hauteur de l'œil, et, par un rayon visuel qui rase les bords de la caisse, on regarde une mire un peu éloignée, telle que *m*. Alors, on voit une image *directe* de la mire dans la direction *pm*, puis

Digitized by Google

l'on en voit une image renversée dans la direction *pm'*. C'est cette seconde image qui est analogue aux images renversées du mirage; elle est évidemment produite par la réflexion de la lumière sur les couches d'air chaud qui avoisinent la paroi de la caisse, et non par une réflexion qui aurait lieu sur la paroi elle-même. Il est indifférent pour le succès de l'expérience que le rayon visuel rase une paroi latérale ou la paroi supérieure.

Wollaston a encore imaginé une autre expérience, par laquelle on produit le mirage dans un liquide. On prend un petit vase en cristal de forme ronde ou carrée; on y superpose, avec tous les soins convenables, deux liquides d'inégale densité qui puissent se combiner lentement près de la couche de superposition : l'eau et l'acide sulfurique, l'eau et l'alcool, l'eau et le sirop de sucre concentré, peuvent très-bien remplir cet objet. Quand la combinaison est opérée bien parallèlement dans une couche d'une épaisseur suffisante, on approche l'œil vis-à-vis cette couche pour regarder une petite mire, disposée sur la paroi opposée, et l'on voit aussi une image droite de cette mire et une image renversée.

296. Phénomènes de mirage observés en différents lieux et dans diverses circonstances. — A Ramsgate, le docteur Vince a observé un effet remarquable du mirage. Lorsque de Ramsgate on regarde du côté de Douvres, on aperçoit par un beau temps les sommets des quatre plus hautes tours du château de Douvres; le reste de l'édifice est caché par une colline dont la crête se trouve à peu près à douze milles de l'observateur; la moitié de cet espace est occupée par la surface de la mer. Le docteur Vince, établi à Ramsgate à peu près à 70 pieds au-dessus de la surface de la mer, fut fort surpris, le 6 août 1806, lorsqu'en regardant du côté de Douvres, vers sept heures du soir, il aperçut non-seulement les quatre tours du château, comme à l'ordinaire, mais le château lui-même dans toutes ses parties et jusqu'à sa base. On le voyait, dit-il, aussi distinctement que s'il eût été tout d'une pièce transporté sur la colline du côté de Ramsgate.

Le même physicien a publié beaucoup d'autres observations qu'il a faites du même lieu, et particulièrement en regardant sur la mer, avec un bon télescope, les vaisseaux qui s'approchaient ou s'éloignaient de Ramsgate. Nous citerons encore les deux observations suivantes :

Un jour, il aperçut un vaisseau qui était précisément à l'horizon : il le distinguait nettement, mais en même temps, il en vit une image renversée, très-régulière et disposée verticalement au-dessus de lui, de telle sorte que le sommet du mât réel et le sommet du mât de l'image renversée étaient en coïncidence (Fig. 3).

Une autre fois, toujours dans le même mois d'août, et vers le soir, il vit un autre effet : l'image du vaisseau était encore renversée, mais au-dessous de lui (Fig. 4).

Le capitaine Scoresby a eu l'occasion d'observer un grand nombre de phénomènes analogues dans les mers du Groenland. Dès que le soleil se montre dans ces parages, les couches d'air qui reposent sur le sol ou la surface de la mer atteignent promptement une température beaucoup plus haute que les couches d'air qui sont à quelques pieds de hauteur, et les réfractions extraordinaires se présentent sous les apparences les plus variées et les plus fantastiques.

MM. Biot et Mathieu ont fait des observations analogues à Dunkerque, sur les bords de la mer, dans la plage sablonneuse qui s'étend au pied du fort Risban. M. Biot en a donné la théorie détaillée dans les *Mémoires de l'Institut* pour 1809; il a fait voir qu'à partir d'un certain point *t*, pris à quelque distance au-devant de l'observateur *o* (Fig. 5), on peut concevoir une courbe *tob*, telle que tous les points qui sont au-dessous d'elle restent invisibles, tandis que tous les points qui sont au-dessus jusqu'à une certaine hauteur, donnent deux images : l'une ordinaire et directe, l'autre extraordinaire, inférieure à la couche et renversée. Ainsi, un homme qui s'éloigne de l'observateur, en partant du point *t*, lui offre les apparences successives qui sont représentées sur la figure 5.

MM. Soret et Jurine ont observé sur le lac de Genève, en septembre 1818, à dix heures du matin, le phénomène remarquable qui est représenté dans la figure 6. La courbe *abc* représente la rive orientale du lac ; une barque chargée de tonneaux ayant ses voiles déployées, était en *p*, vis-à-vis la pointe de Belle-Rive, et faisait route pour Genève ; les observateurs l'apercevaient avec un télescope dans la direction *gp* ; ils étaient au bord du lac, au deuxième étage de la maison de Jurine, à une distance d'environ deux lieues. Pendant que la barque prit successivement les positions *q*, *r*, *s*, on en vit une image *latérale* très-

Digitized by Google

sensible, en q', r', s', qui s'avançait comme la barque elle-même, mais qui semblait s'écarter à gauche de gp, tandis que la barque elle-même s'en écartait à droite. Quand le soleil éclairait les voiles, cette image était assez éclatante pour être aperçue à l'œil nu.

La direction des rayons solaires au moment de l'observation est indiquée en ly.

Il suffit de connaître la position des lieux pour voir à l'instant que c'est un phénomène de *mirage latéral :* à droite de gp, l'air était resté dans l'ombre pendant une partie de la matinée; à gauche, au contraire, il avait été échauffé par le soleil; la surface de séparation de l'air chaud et de l'air froid devait être à peu près *verticale* dans une petite étendue au-dessus de l'eau; de part et d'autre de cette couche s'était fait un mélange de densité croissante, en allant de gauche à droite, et là se produisait, dans les couches verticales, ce qui se produit ordinairement sur le sol dans des couches horizontales.

Ces exemples seront suffisants pour donner une idée des apparences indéfiniment variées ou singulièrement bizarres qui peuvent résulter des réfractions extraordinaires que la lumière éprouve dans des couches d'air dont les densités changent rapidement. Nous avons supposé que ces changements s'accomplissaient dans des couches planes et régulières; mais l'on conçoit qu'ils pourront souvent, par une foule de causes, s'accomplir dans des couches courbes et irrégulières : alors les images produites par le mirage seront déformées dans tous les sens, tantôt élargies, tantôt allongées outre mesure, et quelquefois dispersées comme si l'objet lui-même était brisé en mille pièces. On ne peut pas douter que le phénomène connu sous le nom de *Fata Morgana* ne soit un effet du mirage. Il s'observe à Naples, à Reggio et sur les côtes de la Sicile; à certains moments, le peuple se porte en foule sur le rivage de la mer pour jouir de ce singulier spectacle; on voit dans les airs, à de grandes distances, des ruines, des colonnes, des châteaux, des palais, et une foule d'objets qui semblent se déplacer, et qui changent d'aspect à chaque instant. Toute cette féerie n'est qu'une représentation de quelques objets terrestres, qui sont invisibles dans l'état ordinaire de l'atmosphère, et qui deviennent apparents et mobiles quand les rayons de lumière qu'ils envoient se meuvent en lignes courbes dans les couches d'air d'inégales densités.

Digitized by Google

ARC-EN-CIEL.

297. Explication du phénomène de l'arc-en-ciel. — Tout le monde a pu remarquer que, pour voir un arc-en-ciel, il faut tourner le dos au soleil et regarder une nuée qui donne de la pluie, et qui en même temps se trouve vivement éclairée par la lumière solaire. Alors, l'arc coloré qui se développe dans les airs peut être considéré comme faisant partie de la base d'un cône, dont le sommet est dans l'œil de l'observateur, et dont l'axe prolongé par derrière va passer précisément par le centre du soleil. Il est facile de s'assurer que cette condition est toujours remplie, soit pour les beaux arcs-en-ciel que donne la pluie des nuées, soit pour les arcs-en-ciel bien moins complets dans leur étendue que donne la pluie des cascades ou celle des jets d'eau ; elle indique même la position qu'il faut choisir dans ces derniers cas, pour voir briller les couleurs dans toutes les gouttelettes flottantes qui sont formées par la chute de l'eau, et ensuite disséminées par le vent.

D'après toutes les apparences du phénomène, on ne peut douter qu'il ne soit produit par une modification particulière que la lumière solaire éprouve dans les gouttes d'eau. Nous allons voir en effet que les couleurs qu'on aperçoit sont apportées dans l'œil par des rayons qui viennent directement du soleil, après avoir été réfractés, réfléchis et décomposés dans ces petites parcelles aqueuses, dont la forme est parfaitement sphérique.

Pour prendre une juste idée de la marche des rayons solaires dans un cercle liquide, on peut faire l'expérience suivante :

vv' (Fig. 7) représente une coupe horizontale du volet de la chambre noire, et celle d'une très-petite ouverture *o* percée dans son épaisseur. A quelque distance derrière ce volet, et à la hauteur de l'ouverture, on dispose un vase de cristal parfaitement cylindrique et rempli d'eau; la figure représente seulement la coupe horizontale de ce vase. Ensuite, on fait entrer un rayon solaire dans la direction *oi*, et l'on regarde d'en haut sa marche dans l'intérieur de l'eau : ce liquide sera toujours assez peu limpide pour que la trace de la lumière s'y trouve sensiblement marquée. Il sera facile de voir que le rayon parcourt la route *i*, *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*..., et qu'à chaque incidence sur la paroi il éprouve à la fois une réflexion et une réfraction : c'est par les réflexions qu'il continue sa route dans le liquide, et par les réfractions qu'il

Digitized by Google

diminue d'intensité en donnant naissance aux faisceaux émergents a', b', c', d', e', f'..., qui sont tous des spectres plus ou moins étalés, comme si le faisceau avait traversé un prisme. Après quatre ou cinq réflexions, ces faisceaux émergents auront encore une intensité sensible.

Ce qui arrive ici se reproduira indubitablement dans une goutte de pluie sphérique, quelque petite qu'elle soit; car le premier plan d'incidence détermine dans cette sphère un grand cercle, dans lequel se mouvra le rayon, comme dans la section du cylindre de l'expérience précédente.

Cela posé, voici la propriété fondamentale sur laquelle repose la formation de l'arc-en-ciel. Concevons un rayon qui sorte après avoir éprouvé une réflexion intérieure en b (Fig. 8) : sa direction d'émergence ec fera, avec sa direction d'incidence sa, un certain angle ste, que nous désignerons par d; c'est ce que l'on appelle la *déviation*. Si l'on désigne par i l'angle d'incidence san, et son égal oat, par r l'angle de réfraction oab, et son égal oba, on aura évidemment : $oba = bat + bta$, ou $r = i - r + \frac{d}{2}$, d'où $d = 4r - 2i$. Or, la propriété dont il s'agit, c'est que cette déviation est susceptible d'un maximum. On le démontre par les règles ordinaires du calcul différentiel, en remarquant que les quantités i et r, qui varient ensemble, sont liées entre elles par la relation $\sin i = n \sin r$; et l'on trouve ainsi que cette valeur maximum de la déviation a lieu pour une incidence i, déterminée par la relation $\cos^2 i = \frac{n^2 - 1}{3}$.

Admettons ces résultats du calcul, et essayons seulement de faire comprendre comment cette propriété du maximum détermine la production des couleurs. Considérons d'abord de la lumière rouge. Pour cette nuance du spectre, l'indice de la réfraction est $n = 108/81$. En substituant cette valeur dans l'expression précédente de $\cos i$, nous en déduirons $i = 59° 23' 30''$: c'est-à-dire, que le rayon rouge qui tombe sous cette incidence est de tous les rayons rouges incidents celui qui éprouve la déviation maximum, et cette déviation est de $42° 1' 40''$. Supposons que nous ayons tracé sa route $sabce$ (Fig. 8), et que nous voulions examiner ensuite la route des deux rayons voisins, qui tombent, l'un avec une obliquité un peu moindre, et l'autre avec une obliquité un peu plus grande. Puisque leurs rayons émergents e' et e''

Digitized by Google

ont une déviation un peu moindre que celle de *e*, il est évident qu'ils sont sensiblement parallèles à *e* ; par conséquent, le petit pinceau composé de ces rayons émergents se propagera sans diminuer d'intensité, et il pourra ainsi produire une vive impression sur l'œil du spectateur. Au contraire, tout autre pinceau émergent, étant composé de rayons qui *divergent*, diminue nécessairement d'intensité en s'éloignant, et devient insensible à la distance où l'œil du spectateur peut le recevoir.

Tel est le principe sur lequel nous allons nous appuyer pour expliquer maintenant avec la plus grande facilité toutes les circonstances que peut présenter l'arc-en-ciel dans sa grandeur, dans sa forme et dans l'arrangement de ses couleurs.

Pour mieux fixer les idées, supposons que les rayons du soleil couchant éclairent une nuée de pluie, et qu'un observateur soit convenablement placé pour regarder la nuée en tournant le dos au soleil (Fig. 9). Concevons une ligne droite qui passe par le centre du soleil et par l'œil de l'observateur, pour se prolonger à l'infini vers l'orient ; dans notre supposition, cette ligne *oh* sera horizontale. Concevons ensuite une seconde ligne qui coupe la première dans l'œil de l'observateur, et qui fasse avec elle un angle de 42° 1′ 40″, et qui se prolonge indéfiniment dans la nuée. Imaginons enfin que cette seconde ligne tourne autour de la première, sans cesser de remplir les conditions précdentes, et décrive ainsi une surface conique dont nous avons à considérer seulement la moitié supérieure. Cette ligne, dans chacune de ses positions, rencontrera une foule de gouttes de pluie. Mais arrêtons notre pensée sur celles qu'elle rencontre sous l'angle d'émergence qui donne le maximum de déviation pour la lumière rouge. Soit *abc* l'une de ces gouttes : le pinceau de lumière qu'elle reçoit du centre du soleil est horizontal et parallèle à *oh* ; dans tous les rayons qui le composent, il y a un certain rayon *sa*, qui, après avoir été successivement réfracté en *a*, réfléchi en *b*, puis réfracté en *c*, vient sortir dans la direction *ce* avec la déviation maximum : car *sa* étant parallèle à *oh*, l'angle *ste* est de 42° 1′ 40″, comme l'angle *eoh*.

Donc, dans cette direction, l'observateur apercevra la lumière rouge du spectre.

Ce que nous venons de dire par rapport au centre du soleil, s'applique à tous les points du disque de cet astre ; et en répétant la même construction pour chacun d'eux, et particulière-

ment pour les deux bords opposés, qui sont vus de la terre sous un angle de 30′, il est évident que l'observateur, voyant une ligne rouge pour chaque point du soleil, verra pour leur ensemble une bande rouge sous-tendant à l'œil un angle de 30′, comme le disque du soleil lui-même.

Nous allons maintenant chercher la cause des autres couleurs de l'arc-en-ciel et de leur arrangement.

La lumière violette, par exemple, ayant, dans son passage de l'air dans l'eau, un indice de réfraction de 109/81, il est évident que, pour elle, le maximum de déviation n'est pas le même que pour la lumière rouge, et qu'il correspond à une autre incidence. En mettant pour n cette valeur dans l'expression précédente, de $\cos^2 i$, on trouve : $i = 58°$ pour le violet, et $d = 40° 17'$.

Ainsi, pour avoir la position de l'arc violet, il faut mener par l'œil de l'observateur une ligne faisant avec oh un angle de 40° 17′ ; et il est évident, d'ailleurs, que la bande violette sera vue, comme la bande rouge, d'une largeur correspondant à 30′.

Toutes les couleurs intermédiaires du spectre donneront aussi des bandes de même largeur ; mais elles seront placées à des hauteurs intermédiaires entre celle du rouge et celle du violet.

Il sera facile de déterminer par le calcul la véritable position de toutes ces bandes, l'étendue dans laquelle elles se superposent, et par conséquent les teintes qui doivent en résulter vers le milieu de l'arc-en-ciel.

On voit donc, comme conséquence définitive de cette discussion, que toutes les couleurs de l'iris sont sur des surfaces coniques plus ou moins ouvertes, ayant toutes pour axe commun la ligne menée par le centre du soleil et par l'œil de l'observateur ; que le cône du violet est à l'intérieur, faisant avec l'axe un angle de 40° 17′, que le cône du rouge est à l'extérieur, faisant avec l'axe un angle de 42° 2′ ; et que la largeur totale des couleurs occupe par conséquent une étendne de 1° 45′.

Newton, qui a donné le premier une explication complète de l'arc-en-ciel, a vérifié tous ces résultats par l'expérience.

Quant à l'étendue de l'arc coloré que l'on aperçoit, il est évident qu'elle dépend de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon. Au coucher du soleil, l'arc sera vu à l'orient, et formera une demi-circonférence entière pour l'observateur qui serait dans la plaine; mais il pourrait former plus d'une demi-circon-

Digitized by Google

férence pour l'observateur qui serait au sommet d'une haute montagne, sur un pic élevé et d'une petite largeur. Au lever du soleil, les mêmes phénomènes se reproduisent du côté de l'occident. Plus le soleil est élevé sur l'horizon, moindre est l'étendue de l'arc que l'on aperçoit. Cependant, du haut d'un grand mât d'un vaisseau, le soleil étant directement au zénith, on pourrait voir à ses pieds, sur la mer, un arc-en-ciel d'une circonférence entière.

Outre l'arc-en-ciel dont nous venons de parler, on observe quelquefois un second arc-en-ciel, que l'on appelle *extérieur*, parce qu'il enveloppe le premier. Il est produit par la lumière qui a éprouvé deux réflexions intérieures, comme on peut le voir dans la figure 10.

sabcde est la marche du rayon qui donne l'arc-en-ciel extérieur; il entre dans la direction *sa*, et il sort dans la direction *de*.

Il est facile de voir que la déviation *ste*, que nous appellerons d', est alors donnée par l'équation :

$$d' = 6r - 2i - 180^\circ,$$

et que son maximum correspond à une incidence déterminée par $\cos^2 i = \frac{n^2 - 1}{8}$.

En faisant les calculs pour la lumière rouge et pour la lumière violette, on trouve les résultats suivants :

Rouge $i = 71^\circ\ 50'$, $r = 45^\circ\ 27'$. $d' = -50^\circ\ 59'$.
Violet $i = 71^\circ\ 26'$, $r = 44^\circ\ 47'$, $d' = -54^\circ\ 9'$.

Le signe *moins*, qui précède la valeur de d', annonce que les rayons incidents et émergents se coupent au-devant du globule d'eau.

Ainsi, dans le second arc-en-ciel, le rouge est en dedans et le violet en dehors. Les couleurs sont développées sur une étendue de $3^\circ\ 10'$. C'est une largeur presque triple de celle du premier arc. Enfin, l'intervalle compris entre le rouge intérieur du second arc et le rouge extérieur du premier est donné par la différence des déviations correspondantes, c'est-à-dire qu'il est égal à $50^\circ\ 59' - 42^\circ\ 2'$, ou à $8^\circ\ 57'$.

Newton avait aussi pris des mesures exactes qui confirment ces résultats.

Digitized by Google

En éliminant *i* et *r* entre les trois équations qui déterminent le premier ou le deuxième arc, M. Babinet arrive aux équations suivantes : pour le premier, $\sin^2\frac{d}{2}=\frac{(4-n^2)^3}{27\,n^4}$; pour le deuxième, $\cos^2\frac{d}{2}=\frac{(n^2-1)(9-n^2)^2}{64\,n^6}$, qui donnent directement la déviation au moyen de l'indice de réfraction.

Il paraît que, dans des circonstances extrêmement favorables, on a quelquefois observé un troisième arc-en-ciel ; mais sa lumière est toujours très-affaiblie, parce qu'elle a éprouvé un plus grand nombre de réflexions intérieures dans les gouttes de pluie.

298. Il y a aussi des arcs *secondaires* ou *surnuméraires* qui paraissent résulter des interférences des rayons qui ont traversé les gouttes d'eau avec ceux qui ne les ont pas traversées en même nombre. M. Babinet rend sensibles les franges analogues aux contours des arcs-en-ciel, ou des arcs surnuméraires, en dirigeant un trait de lumière sur un filet d'eau vertical et cylindrique de 1 à 2 millimètres de diamètre.

La lune peut donner des arcs-en-ciel comme le soleil, surtout quand elle est pleine et qu'elle brille de tout son éclat. Il arrive cependant, même dans ces circonstances, que les couleurs sont toujours très-pâles, lorsqu'on les compare aux couleurs des arcs-en-ciel solaires.

HALOS, PARHÉLIES, CERCLE PARHÉLIQUE, COURONNES, OMBRES DIVERSES, ÉTOILES FILANTES, AÉROLITHES.

299. Les *halos* sont des cercles colorés, ayant le rouge en dedans, qui apparaissent autour du soleil dans certaines saisons de l'année. Leur bord intérieur est en général assez bien défini, tandis que leur bord extérieur est à la fois plus vague et moins coloré. Le demi-angle visuel du plus petit de ces cercles est de 22 à 23°, et le demi-angle visuel du plus grand d'environ 46° ; il arrive rarement que l'on puisse voir en même temps le halo de 23° et celui de 46°. Mariotte avait donné de ce phénomène une explication qui a été confirmée par toutes les observations ultérieures. Cette explication repose sur la présence dans l'atmosphère d'une multitude de petites aiguilles de glace, qui réfractent la lumière solaire. En effet, la glace cristallise, en formant des prismes triangulaires réguliers, dont les faces font entre elles des angles de 60°, et sont perpendiculaires aux bases. Or,

Digitized by Google

si l'on admet que ces prismes aient leurs axes horizontaux, et que leurs faces soient convenablement tournées, il est facile de voir que la *déviation minimum* qu'ils impriment aux rayons solaires incidents est d'environ 23° pour la lumière rouge, puisque d'après la formule on a $\sin\left(\frac{d+60}{2}\right) : \sin 30 = 108 : 81$, ou à peu près, car on ne connaît pas très-exactement l'indice de réfraction de la glace. Ces rayons, qui ont éprouvé la déviation minimum, sont analogues aux *rayons efficaces* de l'arc-en-ciel, puisqu'ils sont sensiblement parallèles, et arrivent à l'œil sans diminuer d'intensité. Cette hypothèse explique donc à la fois la formation du halo de 23°, l'arrangement de ses couleurs et ses dimensions. D'ailleurs M. Arago s'est assuré que la lumière est en effet polarisée, comme la lumière réfractée, et non pas comme la lumière réfléchie.

Le halo de 46° s'explique en admettant que les prismes ont leur axe obliquement situé, de telle sorte que l'angle réfringent soit alors l'angle droit que les faces latérales font avec la base du prisme. La déviation minimum pour cet angle réfringent de 90° est en effet d'environ 46°, comme l'indique l'observation.

Le *cercle parhélique* est un cercle blanc horizontal, *passant par le soleil*, et formant une bande assez vivement éclairée, dont la hauteur est égale au diamètre de l'astre ; il n'accompagne pas toujours le halo. M. Babinet regarde le cercle parhélique comme formé par la réflexion que la lumière solaire éprouve sur les faces verticales des aiguilles de glace disposées dans tous les sens. On comprend en effet que, si l'on prend la verticale de l'observateur comme axe d'un cône droit, ayant pour génératrice la ligne qui joint l'œil de l'observateur au centre du soleil, il sera toujours possible de mener par la génératrice primitive et par un point quelconque de la base au cône, supposé dans la région des aiguilles flottantes de glace, un plan perpendiculaire à une petite facette verticale, passant par ce point de la base du cône, et convenablement orientée, pour que ce plan contienne les angles d'incidence et de réflexion, et pour que ces angles soient égaux. Cependant, il reste à discuter en détail les diverses apparences du cercle parhélique dans ses différents points, et malheureusement l'on n'a que de très-rares occasions de l'observer.

Le cercle parhélique, lorsqu'il est complet, pénètre dans l'intérieur des halos, et les coupe en deux parties égales ; en même

temps, l'on observe encore quelquefois une bande blanche qui coupe les halos verticalement, formant ainsi, avec le cercle parhélique, une croix plus ou moins bien définie dans l'intérieur du halo de 23°, le soleil formant par conséquent le centre de cette croix. Quand le phénomène est complet, on observe enfin, un peu au dehors du halo de 23°, et sur les bras de la croix, des images très-vives et colorées du soleil, puis l'on en voit encore une autre que l'on nomme *anthélie* ou faux soleil, parce qu'elle se trouve sur le cercle parhélique au point diamétralement opposé au vrai soleil. M. Babinet a essayé d'expliquer toutes ces apparences, mais il n'a pas publié le détail de ses recherches sur ce sujet. (*Comptes rendus*, 1837.)

300. Les *couronnes* ont, à la première vue, l'apparence des halos, mais elles en diffèrent essentiellement, en ce que le *rouge est en dehors* et le *violet en dedans*, et en ce que le demi-angle visuel de la première couronne paraît toujours être compris entre 1° et 2°; et, en prenant ce demi-angle pour unité, ceux des autres couronnes suivent la série des nombres 2, 3, 4, etc., comme M. Delezenne l'a démontré par plusieurs observations. Ce phénomène paraît être analogue à celui des couronnes que l'on observe en regardant le soleil ou une bougie avec un verre couvert de lycopode. L'explication théorique de ces apparences me semble laisser encore beaucoup à désirer; cependant on verra avec intérêt l'énoncé du théorème sur lequel M. Babinet fait reposer l'explication qu'il en donne (*Comptes rendus*, 1837). C'est en s'appuyant sur le même principe que M. Babinet explique aussi le phénomène des ombres argentées observées par M. Necker, de Genève; les couleurs des fils d'araignée et celles des objets très-déliés exposés aux rayons solaires sous certaines conditions.

301. Les *étoiles filantes* ont, dans ces derniers temps, attiré l'attention d'une foule d'observateurs : on a constaté qu'elles sont en général hors des dernières limites de l'atmosphère, et que leur distance s'élève souvent à plus de deux cents lieues, que leur vitesse varie de six à dix lieues par seconde; qu'il y a peu de nuits où un observateur, s'attachant à explorer seulement un quart du ciel, n'en observe au moins six ou huit par heure; qu'à certaines époques de l'année, et surtout du 11 au 13 novembre et du 10 au 12 août, le nombre des étoiles filantes est beaucoup plus considérable, et qu'elles prennent alors une di-

rection déterminée. Ces résultats conduisent à supposer que les étoiles filantes sont de petits corps célestes dispersés en plus grande abondance dans certaines régions du ciel, où ils se meuvent avec rapidité, et qu'ils deviennent visibles pour nous, lorsque la terre, par son mouvement de rotation autour du soleil, se rapproche des régions où semblent se concentrer les orbites de ces espèces de corps. On peut consulter sur ce sujet le Mémoire très-intéressant de M. Quetelet (*Catalogue des principales apparitions d'Étoiles filantes*, 1839).

302. Les *aérolithes*, dont la chute a été constatée par tant d'observations authentiques, ne paraissent pas être sans analogie avec les étoiles filantes.

Depuis le commencement du siècle, on peut estimer à une centaine environ le nombre des aérolithes qui sont tombés en Europe seulement, et dont la chute a été bien constatée. On peut regarder comme un fait général, qu'une fois arrivés près de la terre, ces météores se présentent sous l'apparence d'un globe de feu plus ou moins volumineux, animé d'une grande vitesse, laissant sa route, quelquefois sinueuse, marquée par une traînée de lumière qui persiste pendant quelques secondes ou même pendant quelques minutes; ce globe éclate, soit dans l'atmosphère, soit au moment de son contact avec la terre, et les fragments en sont dispersés à diverses distances. Tous les fragments qui ont été recueillis sont recouverts *en tout* ou *en partie* d'une couche d'apparence vitreuse, et l'analyse chimique a constaté que leur composition diffère de celle de tous les minerais connus, que le fer en fait essentiellement partie, et le nickel très-souvent.

Digitized by Google

CHAPITRE IV.

De l'électricité atmosphérique.

303. **Première découverte sur l'électricité atmosphérique.** — Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg, et célèbre inventeur de la machine pneumatique, fut le premier qui découvrit quelque apparence de lumière électrique. Le docteur Wall, presque à la même époque, en excitant l'électricité sur un grand cylindre d'ambre, observa une étincelle plus vive et un bruit beaucoup plus fort; et, chose digne de remarque, cette première étincelle produite par la main des hommes fut à l'instant comparée aux éclats de la foudre. Cette lumière et ce craquement, dit Wall dans son Mémoire (*Trans. philos.*), paraissent en quelque façon représenter le tonnerre et l'éclair. L'analogie était frappante, il ne fallait que de l'imagination pour la saisir ; mais, pour en démontrer la vérité, pour trouver dans un phénomène si petit les causes et les lois du plus grand phénomène de la nature, il fallait une série de preuves que l'on ne pouvait attendre que d'un génie supérieur. Cependant plusieurs physiciens cherchaient ces preuves dans des rapprochements plus ou moins ingénieux : les uns remarquaient que l'étincelle est *crochue* comme l'éclair, d'autres pensaient que le tonnerre est entre les mains de la nature ce que l'électricité est entre les nôtres : « J'avoue que cette idée me plairait beaucoup, disait l'abbé Nollet, si elle était bien soutenue; et, pour la soutenir, combien de raisons spécieuses, etc. » Enfin, tout se passait en raisonnements qui ne pouvaient rien conclure, parce qu'en physique, c'est l'expérience seule qui doit donner ses conclusions. Pendant que l'on raisonnait ainsi en Europe et dans tout l'ancien monde savant sur cette grande question, l'on expérimentait en Amérique, chez un peuple nouveau, à peine connu dans les sciences, et ces expériences s'attaquaient directement à la foudre. Franklin trouvait le moyen de la faire descendre du ciel pour l'interroger elle-même sur son origine. Après avoir fait plusieurs découvertes électriques, particulièrement sur la bouteille de Leyde et sur le

pouvoir des pointes, Franklin eut la pensée hardie d'aller chercher l'électricité au sein des nuages ; il avait conclu de quelques expériences décisives qu'une tige de métal pointue, élevée à une grande hauteur, au sommet d'un édifice, devait recevoir l'électricité des nuées orageuses. Il attendait avec une grande anxiété la construction d'un clocher que l'on devait à cette époque élever à Philadelphie ; mais, lassé d'attendre et impatient d'exécuter une expérience qui devait lever tous les doutes, il eut recours à un autre moyen plus expéditif et non moins sûr pour les résultats. Comme il ne s'agissait que de porter un corps dans la région du tonnerre, c'est-à-dire à une assez grande hauteur dans les airs, Franklin imagina que le cerf-volant, dont s'amusent les enfants, pouvait lui servir aussi bien qu'aucun clocher que ce pût être. Il prépara donc deux bâtons en croix, un mouchoir de soie, une corde d'une longueur convenable, et, profitant du premier orage, il s'en fut dans les champs tenter l'expérience. Une seule personne l'accompagnait : c'était son fils. Craignant le ridicule dont on ne manque pas de couvrir les essais infructueux, comme il le dit avec ingénuité, il n'avait voulu mettre personne dans sa confidence. Le cerf-volant était lancé. Un nuage qui promettait beaucoup n'avait produit aucun effet ; d'autres nuages s'avançaient, et l'on peut juger de l'inquiétude avec laquelle ils étaient attendus. Tout paraissait tranquille, on ne voyait aucune étincelle, aucun signe électrique ; à la fin, cependant, quelques filaments de la corde commençaient à se soulever comme s'ils eussent été repoussés ; un petit bruissement se fit entendre : encouragé par ces apparences électriques, Franklin présente le doigt à l'extrémité de la corde, et voit paraître à l'instant une vive étincelle qui fut bientôt suivie de plusieurs autres. Ainsi, pour la première fois, le génie de l'homme put se jouer avec la foudre et surprendre le secret de son existence.

L'expérience de Franklin eut lieu en juin 1752 ; elle fut répétée dans tous les pays savants, et partout avec le même succès. Un magistrat français, de Romas, assesseur au présidial de Nérac, profitant de la première pensée de Franklin, qui avait été publiée en France, avait imaginé aussi de substituer le cerf-volant aux barres élevées ; et dès le mois de juin 1753, avant d'avoir connaissance des résultats de Franklin, il avait obtenu des signes électriques très-énergiques, parce qu'il avait eu l'heu-

Digitized by Google

reuse idée de mettre un fil de métal dans toute la longueur de la corde (*Mém. des Savants étrangers*, t. II). Plus tard, en 1757, de Romas répéta de nouveau ces expériences pendant un orage, et cette fois il obtint des étincelles d'une grandeur surprenante. « Imaginez-vous de voir, dit-il, des lames de feu de neuf ou dix pieds de longueur et d'un pouce de grosseur qui faisaient autant ou plus de bruit que des coups de pistolet. En moins d'une heure, j'eus certainement trente lames de cette dimension, sans compter mille autres de sept pieds et au-dessous. » (*Mém. des Savants étrangers*, t. IV.)

Malgré toutes les précautions bien entendues que prenait cet habile expérimentateur, il fut une fois renversé par la violence du choc.

Ces résultats démontrent d'une manière assez éclatante que la foudre n'est en effet qu'une étincelle électrique.

Les cerfs-volants qui ont servi à prouver cette identité peuvent servir à beaucoup d'autres expériences qu'il serait bon de tenter maintenant pour l'avancement de la science : cependant leur usage ne peut jamais être assez ordinaire pour qu'il convienne d'en donner ici la description.

304. De l'électricité pendant les orages. — En étudiant l'état électrique des nuages qui passent successivement au-dessus d'un cerf-volant, on reconnaît par expérience qu'ils sont chargés, les uns d'électricité vitrée, les autres d'électricité résineuse, et il s'en trouve qui sont à l'état naturel. Bien que nous ne sachions rien sur l'arrangement de l'électricité dans l'intérieur des nuages et à leur superficie, nous pouvons cependant conclure avec certitude que ces corps électrisés se repoussent quand ils ont la même électricité, et qu'ils s'attirent quand ils ont des électricités contraires. Ces attractions et ces répulsions entrent sans doute pour quelque chose dans les mouvements extraordinaires que l'on observe dans le ciel au moment des orages : le vent n'est plus alors la seule puissance qui emporte les nuages ; son influence est modifiée par les actions électriques qui s'exercent avec plus ou moins d'énergie sur ces amas considérables de vapeurs : aussi les voit-on s'approcher rapidement ou s'éloigner comme s'ils étaient poussés en sens contraire, ou tournoyer sur eux-mêmes comme si le vent qui les emporte n'était lui-même qu'un vaste tourbillon. C'est au milieu de cette agitation générale de l'atmosphère que l'on voit briller l'éclair et qu'on entend retentir les éclats du

tonnerre. Essayons de rendre compte de ces deux phénomènes : de la lumière et du bruit.

On voit quelquefois l'éclair fendre la nue et sillonner une grande étendue du ciel ; lorsque, du haut des montagnes, on observe ce phénomène à ses pieds, on peut mieux juger encore de l'espace qu'il occupe, et tous les observateurs s'accordent à dire qu'ils ont vu des éclairs qui avaient certainement plus d'une lieue de longueur. On sait aussi que les mêmes nuages, suspendus dans les mêmes régions du ciel, peuvent donner successivement plusieurs éclairs ; ainsi, pour reprendre leur état naturel, ils se comportent autrement que les corps conducteurs électrisés. Enfin, tout le monde sait que la trace de l'éclair est presque toujours une courbe en zigzag, dont les plis sont plus ou moins développés ou plus ou moins rapprochés. Ces trois phénomènes, de la forme de l'éclair, de ses apparitions répétées et de sa longueur, ne peuvent pas être complétement expliqués dans l'état actuel de la science.

La forme en zigzag est commune à l'éclair et à l'étincelle : il suffirait d'une seule explication pour les deux cas ; mais j'avoue qu'à ma connaissance il n'y a rien de satisfaisant sur ce sujet.

Les amas de vapeur qui constituent les nuages ne sont pas des corps conducteurs comme des masses métalliques ; et, sans savoir comment l'électricité se distribue et se met en équilibre sur ces conducteurs imparfaits qui ont souvent plusieurs lieues de superficie, il est évident qu'il ne suffirait pas de les mettre un instant en contact avec le sol pour les décharger complétement ; et il est impossible par conséquent qu'une seule étincelle les remette à l'état naturel. Ainsi, au sein du même nuage on verra nécessairement briller plusieurs éclairs.

La longueur de l'éclair paraît être aussi une conséquence de l'imparfaite conductibilité des nuages et de la mobilité de leurs parties constituantes. Pour se rendre compte de ce phénomène, il ne faut pas comparer l'électricité des nuages à celle d'une batterie électrique. Ici, lorsque les deux électricités dissimulées font effort pour se rejoindre, elles ne peuvent jamais franchir qu'un très-petit espace : par exemple, la plus forte charge de la plus forte batterie ne part pas à trois ou quatre centimètres ; il est facile d'en voir la raison ; tant que les points qui se rapprochent pour fermer le circuit entre l'intérieur et l'extérieur de la batterie restent un peu éloignés, les électricités ne s'y présentent jamais

Digitized by Google

qu'en très-faible partie, parce qu'elles sont retenues dans l'intérieur des jarres par leur attraction mutuelle au travers de l'épaisseur du verre. Il faut donc comparer l'électricité des nuages aux électricités qui sont *libres* sur la surface des corps plus ou moins conducteurs. Nos meilleures machines peuvent donner l'étincelle à un mètre au travers d'un air très-sec; mais si l'on met quelques poussières sur une étoffe de laine ou de soie, on pourra faire partir l'étincelle à une distance plus grande. Si nous avions à notre disposition des machines assez puissantes pour qu'un léger brouillard autour de leurs conducteurs ne diminuât pas sensiblement leur tension, il est évident que les particules conductrices suspendues dans l'air feraient le même effet que les parcelles métalliques dans l'expérience précédente. Il me semble donc que, pour expliquer la longueur de l'éclair, il faut concevoir que, sur la route que l'éclair va prendre, les parcelles de vapeur et peut-être même les parcelles d'air se trouvent déjà électrisées par les influences contraires des électricités qui tendent à se précipiter l'une vers l'autre, et qu'à un instant donné l'équilibre est à la fin rompu, sans qu'il y ait transport de fluide de l'un des nuages sur l'autre, mais seulement transport successif ou vibration successive de couche en couche sur toute l'étendue que parcourt l'éclair.

Le bruit du tonnerre, dans tous ses éclats et ses roulements formidables, n'est pas plus difficile à expliquer que le craquement de la plus petite étincelle : c'est la vibration de l'air ébranlé avec plus ou moins d'intensité. Quand la décharge d'une batterie passe au travers d'une masse liquide, elle la refoule et la projette dans tous les sens; quand la décharge d'une simple bouteille de Leyde passe au travers d'un gaz, tout le fluide est ébranlé, et il y a augmentation de volume, comme on le peut voir avec le thermomètre de Kinnersley. Ces données suffisent pour expliquer le bruit de l'étincelle et celui du tonnerre. On peut toutefois en tirer deux explications, dont une seule me semble bonne : on peut dire que le fluide électrique s'ouvre un passage au travers de la matière, comme ferait un projectile en vertu de son impénétrabilité, et qu'ensuite l'air rentre dans le vide formé par le passage instantané du fluide, et produit un son comme dans l'expérience du crève-vessie. Suivons, par la pensée, le sillon de l'éclair; imaginons un tube de verre qui en parcourt tous les replis, qui soit vide d'air et qui occupe exactement toute la trace

Digitized by Google

du fluide; admettons enfin qu'à un instant donné ce tube soit rompu dans toute son étendue : le bruit qui en résultera sera le bruit du tonnerre. C'est cette explication qui me semble mauvaise, parce que, d'une part, le passage d'un boulet de canon dans les airs devrait produire un bruit analogue, et l'on n'entend cependant qu'une espèce de sifflement que le soldat le plus timide n'a jamais comparé au bruit du tonnerre; d'une autre part, toutes les expériences indiquent d'une manière positive que jamais le fluide électrique n'éprouve un mouvement de translation analogue à celui des projectiles de matière pondérable. Nous avons déjà insisté sur ce point (t. I, n° **224**), qui nous semble fondamental; et les principes que nous avons adoptés sur le passage de l'électricité au travers des corps bons ou mauvais conducteurs vont nous fournir une autre explication du bruit du tonnerre, qui nous semble de tout point en harmonie avec les faits. Quand l'étincelle part entre deux corps, il y a décomposition et recomposition d'électricité entre toutes les couches où elle paraît, et par conséquent vibration plus ou moins violente dans leur matière pondérable; c'est une espèce de déchirement ou de brusque séparation, comme on le voit dans l'expérience du perce-carte : c'est une vibration qui fait le bruit, en se propageant ensuite dans toute la masse environnante.

Concevons, d'après cela, le sillon d'un éclair d'une lieue d'étendue, ou seulement de 3400 mètres, pour mieux fixer les idées : la lumière brille au même instant dans toute cette étendue; donc, c'est au même instant que le bruit est excité dans toutes les couches. Mais le son se propage lentement, il ne parcourt que 340 mètres en 1″ : par conséquent, pour un observateur qui serait placé sur la ligne de l'éclair, à 340 mètres de l'une de ses extrémités, il y aurait d'abord éclat de lumière, puis silence absolu pendant 1″; alors le bruit commence à l'atteindre, et ce qu'il entend, c'est la vibration qui a été excitée dans la couche la plus voisine de lui; le bruit des autres couches arrive à la suite, se succède sans interruption, et doit durer 10″ dans l'hypothèse que nous avons faite, puisque l'autre extrémité de l'éclair est à 3400 mètres. Ainsi, c'est la longueur de l'éclair qui détermine la durée du bruit; et, pour un observateur qui serait sous la ligne de l'éclair, à peu près vers son milieu, le même coup de tonnerre aurait des roulements moitié moins prolongés que pour un observateur qui serait vers l'une des extré-

mités de l'éclair : celui-ci n'entendrait qu'un coup, tandis que le premier pourrait croire qu'il entend deux coups à la fois, l'un à droite et l'autre à gauche, car le bruit lui viendrait des deux côtés.

Autant il s'écoule de secondes ou de battements du pouls entre l'apparition de l'éclair et la première impression du bruit, autant de fois il y a 340 mètres de distance entre l'observateur et le point de la trace de l'éclair qui se trouve le plus voisin de lui : quand on a vu l'éclair, tout l'effet du tonnerre est produit; le reste n'est plus que du bruit.

Les mêmes principes nous expliquent encore les éclats déchirants, les roulements prolongés, et toutes les périodes de cette redoutable harmonie qu'un seul coup de tonnerre fait entendre. Dans le trajet de l'éclair, toutes les couches vibrantes ne reçoivent pas la même impulsion, parce qu'elles ne sont ni à la même température ni au même état de sécheresse ou d'humidité, ni, par conséquent, sous la même influence électrique. Ainsi, la première impression du son ne sera pas toujours la plus intense, bien qu'elle vienne du lieu le plus rapproché, et, dans une si grande étendue, il est impossible que le son ne se renfle pas à plusieurs reprises.

Ces notions suffisent pour faire comprendre ce que le bruit du tonnerre est en lui-même; mais il peut arriver souvent que les forêts, les vallées, les montagnes, ou même les nuages forment des échos pour le répéter.

305. Des effets du tonnerre lorsqu'il tombe sur la terre. — Le tonnerre *tombe* quand l'éclair jaillit entre un nuage et les corps placés à la surface de la terre : on dit alors que ces corps sont *foudroyés*. Dans le langage de la science, ce mot n'emporte pas nécessairement une idée de destruction, parce que la foudre ne détruit pas inévitablement tout ce qu'elle frappe. Autrefois, on discutait beaucoup sur la question de savoir si la foudre tombe du ciel, ou si elle s'élève de terre vers les nuages; c'était une sorte de dilemme auquel on croyait ne pouvoir échapper; mais ce que nous avons dit précédemment montre, d'une manière assez évidente, que jamais la foudre ne tombe et que jamais elle ne s'élève; car il n'y a jamais translation du fluide électrique de l'un à l'autre des deux points extrêmes de l'éclair. Cependant, pour nous conformer à l'usage, nous dirons que le tonnerre tombe, en nous souvenant toutefois du sens qu'il faut attacher à cette expression.

Digitized by Google

Concevons un nuage orageux, qui soit, par exemple, chargé d'électricité vitrée : son élévation au-dessus du sol sera, comme à l'ordinaire, comprise entre 2000 mètres et 6000 mètres ; il aura une forme quelconque, une épaisseur et une étendue considérables. Supposons d'abord que ce nuage soit au-dessus de la mer ou d'un grand lac : par son influence, il décompose les électricités naturelles de la masse liquide, repousse le fluide vitré dans la profondeur du sol, et attire le fluide résineux à la surface des eaux. L'accumulation de ce fluide peut y être assez grande pour qu'il y ait soulèvement sensible ; et alors on voit une grande vague ou une montagne liquide qui s'élève, et qui reste suspendue aussi longtemps que dure l'action électrique. Mais ce phénomène peut se terminer de trois manières : 1° s'il n'y a aucune explosion dans le nuage orageux, il s'éloigne avec plus ou moins de rapidité ; l'intensité de son action diminue à mesure que la distance augmente ; le fluide résineux, moins attiré, repasse peu à peu dans le sol, et toute la masse des eaux retombe à l'état naturel ; 2° s'il y a une explosion entre le nuage orageux et quelque autre nuage voisin, ou même entre le nuage orageux et quelque autre point de la terre éloigné de la surface liquide que nous considérons en ce moment, il est évident que le nuage, déchargé subitement par cette explosion, cessera subitement son action sur la surface des eaux qu'il avait soulevées ; et le liquide, forcé de reprendre à l'instant son état naturel, retombera sur lui-même avec violence, son électricité résineuse se précipitant dans les profondeurs de l'eau et du sol pour se recombiner avec la vitrée dont elle avait été séparée. Dans ce cas, l'eau est *foudroyée* par *le choc en retour*, dont nous avons déjà parlé (t. I, n° **212**) ; elle est foudroyée sans que la foudre tombe, c'est-à-dire, sans qu'il y ait explosion entre elle et le nuage orageux ; 3° si le nuage orageux est assez près, assez volumineux ou assez fortement électrisé pour que l'étincelle parte entre un point de sa surface et la surface des eaux qu'il avait électrisée par influence, alors l'eau est *foudroyée directement*, ou, comme on le dit ordinairement, le tonnerre tombe dans l'eau. Cette explosion produit en général plus d'effervescence et de bouillonnement dans les eaux que le choc en retour : une telle secousse n'a pas lieu entre les fluides électriques sans qu'il y ait une violente action mécanique dans les éléments pondérables : chacun de ces effets, que nous décrivons longuement,

peut être produit en un instant, et même il ne faut qu'un instant pour les produire successivement.

Après avoir pris pour exemple une masse mobile, homogène, et d'une égale conductibilité électrique dans toutes ses parties, il nous sera facile de comprendre l'effet du nuage orageux sur une vaste plaine composée d'éléments hétérogènes et diversement conducteurs. Les électricités naturelles du sol seront encore décomposées par influence, le fluide vitré sera encore refoulé, et le fluide résineux attiré et accumulé vers la partie supérieure du sol. Mais, dans le cas présent, il ne faut pas nous arrêter à la superficie, il faut pénétrer par la pensée dans toutes les couches qui constituent le sol, jusqu'à une assez grande profondeur, démêler les bons et les mauvais conducteurs, et reconnaître enfin leur forme, leur étendue et leur arrangement. Toutes ces circonstances ont une part plus ou moins marquée dans le phénomène. Il est évident, par exemple, que, s'il y avait à quelques pieds au-dessous du sol une couche métallique d'une grande étendue, l'action du nuage serait plus énergique, la quantité d'électricité accumulée beaucoup plus grande, et l'étincelle partirait plus tôt ; alors la croûte supérieure du sol serait percée par la foudre en un ou plusieurs points, comme la carte ou le carreau de verre dans nos expériences avec les batteries. Cette comparaison suffit pour nous faire comprendre que, dans les vastes plaines, la nature du sol, son état de sécheresse ou d'humidité, et la conductibilité des masses plus ou moins volumineuses que ses couches peuvent contenir, sont des éléments qui déterminent l'explosion de la foudre et les effets extraordinaires qu'elle produit. Dans ce cas, le nuage orageux peut encore n'exercer qu'une action par influence, foudroyer par le choc en retour, ou foudroyer directement

Il ne paraît pas que le premier mode d'action puisse jamais produire aucun phénomène apparent; il n'y a jamais de secousse quand les électricités sont décomposées lentement et lentement recomposées : il paraît cependant que ces changements d'équilibre électrique peuvent être sentis par les êtres organisés, et particulièrement par les malades affectés de quelques maladies nerveuses. Il faudrait des observations plus précises et plus multipliées sur ce sujet.

Le choc en retour est toujours moins violent que le choc direct. On n'a pas d'exemple, à ma connaissance, qu'il ait produit

Digitized by Google

quelque combustion : mais il paraît certain que les hommes et les animaux peuvent être frappés de mort par le choc en retour ; on n'observe alors de trace ni brûlure, ni plaie, ni fracture.

C'est par le choc direct que la foudre produit ses plus terribles effets. Quand elle tombe sur le sol, elle y marque son passage par un ou plusieurs trous plus ou moins profonds : la terre en est remuée, fouillée et arrachée.

Si quelques petites éminences s'élèvent sur les plaines, elles sont frappés plus tôt, parce qu'elles sont plus rapprochées du nuage ; par la même raison, toute élévation au-dessus du sol est plus exposée aux coups de la foudre ; quelques mètres de hauteur de plus suffisent pour déterminer l'explosion ; c'est pourquoi les animaux sont souvent frappés au milieu des plaines : mais, toutes choses égales d'ailleurs, ceux qui sont sur un sol mauvais conducteur courent moins de dangers que ceux qui seraient sur un sol bon conducteur.

Considérons enfin l'action du nuage orageux lorsqu'il passe au-dessus de quelques objets élevés, comme des arbres ou des édifices. Si ces objets étaient non conducteurs, leur présence n'aurait aucune influence, le nuage n'exercerait son action que sur le sol ; mais, comme ils sont plus ou moins conducteurs, leur électricité est décomposée, et elle l'est en raison de leur conductibilité, de leur forme et de leur élévation. Les arbres, à cause de leur nature et surtout à cause de l'humidité qu'ils contiennent, sont en général d'assez bons conducteurs ; et leur cime, toujours plus ou moins rapprochée du nuage, reçoit, par conséquent, une grande accumulation du fluide. C'est par cette raison que les arbres *attirent* la foudre, et les plus hauts sont frappés les premiers. On doit donc, pendant les orages, redouter l'approche d'un arbre, et même l'approche d'un buisson, surtout au milieu des plaines ; car si la foudre éclate, c'est l'arbre ou le buisson qui sera frappé. Dans les pays couverts, le danger n'est pas le même : il est toujours certain que si le tonnerre tombe, il tombera sur un arbre ; mais, au moins, il ne tombera pas sur tous : cependant, pour chercher un abri au moment du danger, le plus habile observateur serait fort embarrassé du choix, et ce qu'il y aurait de mieux à faire serait sans doute d'éviter les arbres et de se coucher par terre.

Les édifices sont, en général, composés de métal, de pierre et de bois, qui reçoivent de la part du nuage orageux des

Digitized by Google

actions très-différentes à cause de leurs différentes conductibilités. Mais quand la foudre éclate, on conçoit qu'elle frappe de préférence tous les meilleurs conducteurs; il importe peu qu'ils soient à découvert ou qu'ils se trouvent enveloppés dans l'intérieur de quelques massifs moins bons conducteurs; l'action par influence n'est empêchée par aucun obstacle; elle se fait sentir sur un clou, au milieu d'une masse de pierres, comme sur une girouette exposée au nuage : c'est ce principe qui explique une foule de phénomènes, d'abord incompréhensibles, que l'on observe dans les explosions de la foudre. Cette puissance semble agir avec une sorte de discernement, elle semble fuir ou respecter un objet qui se trouve sur son passage pour en aller frapper un autre qui est loin et caché. Tous les accidents plus ou moins merveilleux que l'on rapporte à cet égard, ne présenteront sans doute aucun embarras à l'observateur qui aura bien saisi les principes de la conductibilité et de l'électricité par influence.

Après avoir indiqué les principales causes qui déterminent l'explosion de la foudre à la surface de la terre, nous essayerons d'examiner en général les *effets* qu'elle produit. Nous distinguerons ici, comme dans les phénomènes des piles et des batteries, les effets mécaniques, les effets physiques et les effets chimiques.

Les *effets mécaniques* de la foudre sont d'une incroyable intensité : quand le tonnerre tombe dans un appartement, il arrive presque toujours que des meubles ou des ustensiles sont déplacés ou renversés; on a vu souvent des pièces de métal arrachées de leurs scellements et transportées au loin; les arbres sont quelquefois fendus et brisés; mais ordinairement ils sont marqués de la cime jusqu'au pied par un sillon de plusieurs centimètres de large et de plusieurs centimètres de profondeur; alors l'écorce et les fibres arrachées sont lancées à une grande distance; au pied de l'arbre on voit souvent le trou par lequel les fluides se sont répandus dans le sol. Enfin, ce qui paraîtra sans doute encore plus surprenant, un observateur affirme que, par un coup de tonnerre, un petit mur de briques de plusieurs toises de longueur a été arraché de ses fondations, et transporté tout d'une pièce à plusieurs toises de distance. De tels effets ne peuvent être expliqués par les lois ordinaires des attractions électriques, et nous avons indiqué (t. I, nº 233) un principe nouveau qui semble en donner la solution.

Digitized by Google

Les *effets physiques* sont plus analogues à ceux que nous pouvons produire avec nos batteries; ils se réduisent à une élévation de température plus ou moins grande. Quand le tonnerre tombe sur des toits de chaume, sur des meules de fourrage, sur des charpentes sèches, ou même dans certains cas sur des arbres verts, il carbonise les parties qu'il frappe, et trop souvent même il y met le feu et produit des incendies. Je dois ajouter cependant que dans tous les arbres frappés de la foudre que j'ai eu occasion d'observer, il ne s'en est trouvé qu'un très-petit nombre qui offrissent des traces de carbonisation. Les métaux, comme meilleurs conducteurs, sont toujours fortement échauffés par le passage de la foudre; souvent même, ils sont fondus ou volatilisés. Ainsi, il n'est pas rare de voir, dans une maison foudroyée, tous les cordons de sonnette réduits en globules étincelantes ou en fumée. Ces effets sont connus de tout le monde, et l'on devrait prendre garde que, dans les fermes ou dans les maisons qui ne sont pas protégées par des paratonnerres, il ne faut qu'une pièce de métal maladroitement placée, pour que le tonnerre en tombant détermine un incendie.

Les *effets chimiques* sont incomparablement plus intenses que ceux que nous pouvons produire avec nos batteries. Les coups redoublés de la foudre sur les sommets élevés des hautes montagnes laissent des traces de fusion très-sensibles. De Saussure en a observé sur la cime du mont Blanc, dans l'amphibole schisteux; Ramond, sur le pic du Midi, dans le schiste micacé; près de la cime du mont Perdu, sur un calcaire fétide mêlé de sablon quartzeux; et au Puy-de-Dôme, dans une espèce de porphyre qui compose la *Roche sanadaire* : enfin MM. de Humboldt et Bonpland ont vu, sur la plus haute cime du volcan de Toluca, la surface du rocher vitrifiée sur une étendue de plus de deux pieds carrés; il y avait même en plusieurs endroits des trous dont l'intérieur offrait la même croûte vitreuse.

Voici un autre phénomène de fusion bien plus remarquable, qui a été observé et décrit avec beaucoup de soin par le docteur Withering. (*Trans. philos.*, 1790; et *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XIX, p. 395.)

Le 3 septembre 1789, le tonnerre tomba sur un chêne dans le parc du comte d'Aylesford, et tua un homme qui avait cherché un abri sous cet arbre. Le bâton que ce malheureux portait à la main, et qui lui servait d'appui, fut, suivant toute apparence,

Digitized by Google

la principale voie que suivit le fluide électrique, puisque le sol dans le point auquel le bâton aboutissait était percé d'un trou de 5 pouces de profondeur et de 2 ½ de diamètre. Ce trou, examiné peu d'instants après sa formation par M. Withering, ne renfermait que quelques racines de gazon brûlées. Là auraient probablement fini les observations, si lord Aylesford ne s'était déterminé à faire construire une petite pyramide, dans le lieu même de l'événement, avec une inscription destinée à détourner les passants de chercher, en temps d'orage, un abri sous les arbres. Mais, en creusant pour les fondations, on trouva que le sol, dans la direction du trou, avait été noirci jusqu'à la profondeur de 10 pouces; deux pouces plus bas, le terrain quartzeux offrait des traces évidentes de fusion. Les échantillons, adressés à la Société royale avec le Mémoire du docteur Withering, se composaient :

1° D'une pierre quartzeuse dont un des angles avait été complétement fondu ;

2° D'un bloc de sable agglutiné par la chaleur, car il n'y avait aucune matière calcaire entre les grains. Dans cette masse existait une partie creuse, où la fusion avait été si parfaite, que la matière quartzeuse, après avoir coulé tout du long de la cavité, présentait dans le fond une forme globuleuse.

3° De plusieurs pièces plus petites, mais toutes également trouées.

Enfin nous devons citer encore comme un effet chimique de la foudre ces tubes singuliers qui ont été découverts dans les plaines sablonneuses de la Silésie, de la Prusse orientale, du Cumberland, et même du Brésil près de Bahia. On les appelle *tubes fulminaires*, et tout nous porte à croire qu'ils sont bien nommés.

Ces tubes ont, en général, 5 centimètres de diamètre extérieur, quelques millimètres de diamètre intérieur, et jusqu'à 8 ou 10 mètres de longueur; leur surface intérieure est un verre parfait, uni et très-brillant, semblable à l'opale vitreuse; leur surface extérieure est rugueuse, pleine d'aspérités, et forme une espèce de croûte revêtue de grains de quartz agglutinés, comme s'ils avaient éprouvé un commencement de fusion. On les trouve enfoncés dans le sable, tantôt verticalement, tantôt obliquement; quelquefois ils se terminent à leur extrémité inférieure par plusieurs branches semblables à des racines qui deviennent de plus

en plus pointues; elles ont jusqu'à $0^m,33$ de longueur. Le docteur Fiegler, qui a fait beaucoup d'observations sur ce sujet intéressant (*Annalen der Physik*, GILBERT, t. LV et LXI), remarque qu'à une certaine profondeur au-dessous de ces plaines de sable, il y a des nappes d'eau, et il considère les tubes fulminaires comme produits par le passage de la foudre, depuis la surface du sol jusqu'au liquide où elle doit être neutralisée. Toutes les circonstances jusqu'à présent observées concourent en effet à faire adopter cette origine des tubes fulminaires.

Si nous avons examiné séparément ces *trois effets*, ce n'est pas, comme on le pense bien, qu'ils ne soient, en général, simultanés dans la plupart des explosions : il y a toujours froissement des parties, élévation de température, et par conséquent combinaison chimique, si les éléments voisins sont disposés à s'unir ou à se séparer sous ces influences.

Par exemple, quand les corps organisés sont foudroyés, c'est toujours la chaleur et la violence mécanique qui sont les phénomènes les plus apparents. J'ai vu deux malheureux frappés du même coup de foudre, au milieu d'un champ; l'un était mort sur le coup, l'autre eut à souffrir encore quelques heures; leurs vêtements étaient en combustion, de profondes brûlures marquaient le passage des fluides, et le premier avait toute la partie osseuse de la tête brisée comme elle aurait pu l'être par cent coups de massue. Ces effets effrayants sont ceux qui se reproduisent avec plus ou moins d'intensité dans tous les malheurs de cette espèce qui ont été observés, et dont tous les secours de la science ne peuvent affranchir l'humanité.

Pour donner une idée plus complète des terribles effets de la foudre, nous rapporterons ici une relation des malheurs arrivés à *Châteauneuf-lez-Moustiers*, le 11 juillet 1819. Cette relation fut adressée à l'Académie des sciences par M. Trancalye, vicaire général de Digne.

« Il y a un village appelé Châteauneuf, dans l'arrondissement de Digne, département des Basses-Alpes, au sud-est, et limitrophe de la petite ville de Moustiers, connue par une manufacture de faïence, dont l'émail et la qualité justifient la préférence qu'on lui accorde sur toutes celles du royaume. Il est situé au sommet et à l'extrémité de l'une des premières montagnes des Alpes qui forment un amphithéâtre sur Moustiers. Il consiste en quatorze maisons réunies au presbytère et à l'église paroissiale,

sur une éminence coupée par les angles de deux autres montagnes, l'une au levant et l'autre au couchant. L'intervalle qui sépare le village de la montagne du levant est si étroit et si profond, que l'aspect en est effrayant. Cent cinq habitations sont dispersées en hameaux, presque tous sur le penchant de la montagne du levant, et forment une population de cinq cents âmes.

« Le 11 juillet 1819, jour de dimanche, M. Salomé, curé de Moustiers et commissaire épiscopal, alla à Châteauneuf pour y installer un nouveau recteur. Vers les dix heures et demie, on se rendit en procession de la maison curiale à l'église. Le temps était beau : seulement, on remarquait quelques gros nuages. La messe fut commencée par le nouveau recteur.

« Un jeune homme de dix-huit ans, qui avait accompagné M. le curé de Moustiers, chantait l'épître, lorsqu'on entendit trois détonations de tonnerre qui se succédèrent avec la rapidité de l'éclair. Le missel lui fut enlevé des mains et mis en pièces, il se sentit lui-même serré étroitement au corps par la flamme, qui le prit de suite au cou. Alors, par un mouvement involontaire, ce jeune homme, qui avait d'abord jeté de grands cris, ferma la bouche, fut renversé, roulé sur les personnes rassemblées dans l'église, qui toutes avaient été terrassées, et jeté ainsi hors la porte. Revenu à lui, sa première idée fut de rentrer dans l'église, pour se rendre auprès de M. le curé de Moustiers, qu'il trouva asphyxié et sans connaissance. Ce jeune homme fixa sur ce respectable et infortuné pasteur l'attention et les soins de ceux qui, légèrement blessés, pouvaient donner des secours. On le releva, on éteignit la flamme de son surplis, et par le moyen du vinaigre on le rappela à la vie environ deux heures après son étourdissement. Il vomit beaucoup de sang. Il assure n'avoir pas entendu le tonnerre, et n'avoir rien su de ce qui se passait. On le porta au presbytère. Le fluide électrique avait touché fortement la partie supérieure du galon d'or de son étole, coulé jusqu'au bas, enlevé un de ses souliers qu'il porta à l'extrémité de l'église, et brisé la boucle de métal. Le siége sur lequel il était assis avait été brisé.

« Le surlendemain, M. le curé fut transporté dans son presbytère, à Moustiers, pour être pansé de ses blessures, qui n'ont été cicatrisées que deux mois après. Il avait une escarre de plusieurs travers de doigt à l'épaule droite ; une autre s'étendant du

Digitized by Google

milieu postérieur du bras du même côté jusqu'à la partie moyenne et extérieure de l'avant-bras; une troisième escarre, profonde, partait de la partie moyenne et postérieure du bras gauche, et allait jusqu'à la partie moyenne de l'avant-bras du même côté; une quatrième plus superficielle et moins étendue au côté externe de la partie inférieure de la cuisse gauche; et une cinquième sur la lèvre supérieure jusqu'au nez. Il a été fatigué d'une insomnie absolue pendant près de deux mois; il a eu les bras paralysés, et souffre des différentes variations de l'atmosphère.

« Un jeune enfant fut enlevé des bras de sa mère et porté à six pas plus loin : on ne le rappela à la vie qu'en lui faisant respirer le grand air. Tout le monde avait les jambes paralysées. Toutes les femmes, échevelées, offraient un spectacle horrible. L'église fut remplie d'une fumée noire et épaisse; on ne pouvait distinguer les objets qu'à la faveur des flammes des parties de vêtements allumées par la foudre.

« Huit personnes restèrent sur la place; une fille de dix-neuf ans fut transportée sans connaissance à sa maison, et expira le lendemain matin, en proie aux douleurs les plus horribles, à en juger par ses hurlements : de sorte que le nombre des personnes mortes est de neuf; celui des blessés est de quatre-vingt-deux.

« Le prêtre célébrant ne fut point atteint de la foudre, sans doute parce qu'il avait un ornement en soie.

« Tous les chiens qui étaient dans l'église furent trouvés morts dans l'attitude qu'ils avaient auparavant.

« Quoiqu'on ne puisse pas suivre de l'œil toutes les opérations subtiles du fluide électrique, on peut quelquefois en juger par les effets.

« Une femme qui était dans une cabane, à la montagne de Barbin, au couchant de Châteauneuf, vit tomber successivement trois masses de feu, qui semblaient devoir réduire ce village en cendres.

« Il paraît que la foudre frappa d'abord la croix du clocher, qu'on trouva plantée dans la fente d'un rocher, à une distance de 16 mètres. Le feu électrique pénétra ensuite dans l'église par une brèche qu'il fit à la voûte, à la distance d'un demi-mètre de celle par où passe la corde d'une cloche; la chaire fut écrasée. On trouva dans l'église une excavation d'un demi-mètre de diamètre, prolongée sous les fondements du mur jusque sur le pavé de la rue, et une autre qui rentrait sous les fondements

d'une écurie qui est en dessous, et où l'on trouva morts cinq moutons et une jument. »

306. De l'origine de l'électricité atmosphérique et de la formation des nuages orageux. — La question de l'origine de l'électricité atmosphérique est peut-être, de toutes les grandes questions dont s'occupe la météorologie, celle qui a donné naissance au plus grand nombre de dissertations et d'hypothèses plus ou moins singulières. D'habiles observateurs ont essayé de la résoudre par la voie de l'expérience; de Saussure et Volta s'en sont occupés avec ce zèle et cette rare sagacité qu'ils apportaient dans tous leurs travaux, et, s'ils ne sont pas parvenus à des résultats décisifs, s'ils n'ont pas mis au jour la vérité, ils ont du moins indiqué où il fallait la chercher. J'ai repris, en 1825, la question au point où ils l'avaient conduite, et j'ai découvert deux grandes sources d'électricité, qui sont les deux principales causes de l'électricité atmosphérique. On pourra voir tout le détail des expériences dans deux mémoires qui ont été publiés (*Ann. de Chim. et de Phys.*, 1827), et dont nous avons rapporté un extrait (t. I, nº **271**).

Il résulte de ces expériences : d'une part, que la végétation est une source abondante d'électricité ; et, d'une autre part, que de toutes les évaporations qui s'accomplissent sans cesse dans la nature, soit sur les continents, soit sur les mers, il n'en est aucune qui ne soit accompagnée d'une ségrégation chimique et d'un dégagement d'électricité.

Ainsi, la végétation et l'évaporation, voilà les deux grandes sources de l'électricité atmosphérique. Ces causes, plus ou moins actives en chaque lieu, en chaque contrée, suivant les périodes des saisons, sont en même temps constantes tout autour du globe dans le cours d'une année. Ces périodes locales et cette constance universelle qui se montrent dans les causes se reproduisent aussi dans les effets. Dans les divers climats, il y a diverses saisons pour les orages, mais, dans toute l'étendue de l'atmosphère, il se détruit chaque année, par les explosions de la foudre, une certaine quantité d'électricité qui reste à peu près la même; c'est donc cette quantité constante d'électricité qui est aussi reproduite chaque année.

L'acide carbonique et les vapeurs, en se mêlant à l'air, répandent et dispersent, dans toute l'étendue de l'atmosphère, les fluides électriques qu'ils ont pour un instant empruntés à la terre.

Digitized by Google

Ainsi, toutes les régions atmosphériques sont dans un état électrique habituel, mais cet état varie d'une région à l'autre : ici, c'est l'électricité vitrée qui domine; là, c'est l'électricité résineuse; à côté, se trouve peut-être une région presque sans tension électrique ou à l'état naturel.

Les observations constatent, en effet, cet état électrique habituel de l'atmosphère. En 1755, pendant une sécheresse de six semaines, depuis la mi-septembre à la fin d'octobre, Lemonnier observa chaque jour de l'électricité dans l'atmosphère, et cependant la sérénité du ciel fut à peine troublée par quelques nuages durant cet intervalle. Les expériences de de Saussure, Erman, Volta, et d'un grand nombre d'habiles physiciens, confirment ce résultat. On croit même, et c'est une opinion assez généralement adoptée, on croit que sous un ciel serein l'électricité de l'air est plus ordinairement positive, et qu'elle augmente d'intensité à mesure que l'on s'élève. Les diverses séries d'expériences que j'ai eu occasion de faire ne conduisent pas à une conséquence aussi absolue : c'est un sujet de recherches très-intéressant pour les météorologistes. Il se pourrait bien, du reste, que l'air serein fût électrisé positivement dans certaines saisons, et négativement dans d'autres; et peut-être aussi cet état électrique n'est-il pas le même dans tous les climats.

Les appareils nécessaires à ces recherches ne sont ni dispendieux ni embarrassants : un petit électroscope suffit pour indiquer les fortes charges. On peut l'armer d'une pointe ou même d'une baguette assez longue, au bout de laquelle on met un morceau d'amadou enflammé. Lorsque cet instrument ne donne aucun signe d'électricité, il n'en faudrait pas conclure que l'air est à l'état neutre; mais il faut alors employer un condensateur plus ou moins sensible. L'un de ses plateaux communique au sol pendant l'expérience, et l'autre communique par un fil de métal à une baguette isolée, ou même à une longue perche, à l'extrémité de laquelle on allume de l'amadou ou une mèche soufrée. Dans ce cas, il faut avoir soin de ne pas prendre pour de l'électricité de l'air celle qui serait développée par la combustion. Enfin, pour prouver que l'électricité va en croissant à mesure que l'on s'élève, il ne suffit pas d'obtenir de plus fortes charges à mesure que le sommet de la perche s'élève plus haut. Il y a plusieurs autres considérations dont il faut tenir compte, mais dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer ici.

Digitized by Google

D'après ces données, il est facile de comprendre comment se forment les nuages orageux, et comment ils prennent les uns l'électricité positive, les autres l'électricité négative. Toutes les vapeurs, en si prodigieuse quantité, qui se réunissent pour composer un nuage, y portent nécessairement leur propre électricité. Ainsi, la même quantité de fluide électrique, qui était disséminée dans une immense étendue de l'atmosphère, se trouve concentrée dans l'espace occupé par le nuage. Là, elle acquiert par conséquent une tension beaucoup plus grande. Si cette vapeur est électrisée positivement, le nuage sera positif, et il sera négatif si la vapeur est elle-même négative.

Les nuages orageux ne se forment pour l'ordinaire que dans certaines saisons de l'année, et de préférence en certains lieux, parce que l'état électrique de l'air n'a pas la même intensité dans tous les lieux et dans toutes les saisons; et en cet état la vapeur concourt puissamment à produire ces phénomènes, car elle peut acquérir des tensions bien différentes aux diverses températures et par conséquent former des amas ou des nuages dont la constitution est très-différente, soit pour la conductibilité, soit pour les autres propriétés électriques. Mais, il faut l'avouer, si le principe de la formation des nuages orageux ne présente pas de difficultés, les applications en présentent, parce que nous n'avons pas assez de données sur la formation des nuages elle-même.

507. Des paratonnerres. — Les paratonnerres se composent d'une tige métallique pointue qui s'élève dans les airs, et d'un conducteur qui descend de l'extrémité inférieure de la tige jusqu'au réservoir commun.

Les conditions nécessaires pour qu'ils puissent produire leur effet sont :

1° Que la pointe de la tige soit suffisamment aiguë et cependant assez résistante pour n'être pas fondue par un coup de foudre;

2° Que le conducteur communique parfaitement au sol;

3° Que depuis la pointe jusqu'à l'extrémité inférieure du conducteur il n'y ait aucune solution de continuité;

4° Que toutes les parties de l'appareil aient des dimensions convenables.

Pour mieux comprendre ce qu'il y a d'essentiel dans chacune de ces conditions, supposons pour un instant qu'elles soient remplies, et examinons l'effet du paratonnerre sur un nuage orageux

Digitized by Google

qui passe au-dessus de lui. Les électricités naturelles de la tige et du conducteur seront décomposées : celle de même nom sera repoussée dans le sol, où elle pourra se répandre librement, puisque le conducteur communique parfaitement au sol ; celle de nom contraire sera attirée au sommet de la tige, et là elle pourra s'écouler dans l'air par l'extrémité de la pointe. Pendant que le paratonnerre est ainsi en activité, pendant qu'il est traversé par des torrents de fluide électrique, on peut en approcher, on pourrait même le toucher ou le serrer avec la main sans aucun danger, du moins à sa partie inférieure, car auprès de la pointe il y a non-seulement élévation de température mais il se manifesterait aussi des effets de tension.

Supposons maintenant que l'une ou l'autre des trois premières conditions ne soit pas remplie, que l'extrémité de la pointe soit trop émoussée, que le conducteur communique mal au sol, ou qu'il y ait quelque solution de continuité dans sa longueur : alors, il est évident non-seulement que l'accumulation de l'électricité est possible sur le paratonnerre, mais qu'elle est inévitable; c'est un conducteur qui se charge et qui peut recevoir une énorme quantité d'électricité; si on l'approche, on en peut tirer des étincelles, tantôt faibles, tantôt fortes, quelquefois foudroyantes.

Il y aura danger, mais le danger sera différent selon les cas.

Si c'est la pointe seulement qui est émoussée, et que le tonnerre tombe, il frappera la tige, en pourra fondre l'extrémité, mais en général il suivra le fil conducteur et ne fera aucun ravage dans l'édifice.

Si c'est le conducteur qui offre des solutions de continuité ou qui communique mal avec le sol, le tonnerre pourra encore tomber et fondre une longueur plus ou moins grande de la tige ; mais il est presque certain qu'il se portera aussi latéralement sur tous les corps conducteurs voisins, et qu'il pourra exercer sa destruction comme si le paratonnerre n'existait pas.

Mais il y a plus : un paratonnerre qui présente ces défauts est extrêmement dangereux, même quand le tonnerre ne tombe pas ; car, du moment que l'accumulation de l'électricité sur le conducteur est devenue assez grande, le fluide tend à se porter latéralement sur tous les corps conducteurs voisins, et l'étincelle qui en résulte peut les foudroyer ou les enflammer. On en peut citer un déplorable exemple. En 1753, lorsque de Romas faisait en France les belles expériences dont nous avons parlé, Richmann,

Digitized by Google

de l'Académie de Saint-Pétersbourg, et très-habile professeur de physique expérimentale, fut tué subitement par une étincelle à quelque distance d'un paratonnerre qui descendait dans sa maison, et dont il avait interrompu le conducteur pour étudier les effets de l'électricité des nuages. Sokolow, graveur de l'Académie, vit l'étincelle sortir du conducteur et frapper Richmann au front; elle était, dit-il, grosse comme le poing.

Si c'est la quatrième condition qui n'est pas remplie : si les dimensions de la pointe, de la tige ou du conducteur étaient insuffisantes; alors, là où le courant électrique se trouverait trop à l'étroit, le métal serait fondu et tomberait en pluie de feu; quelquefois il pourrait être brisé et comme pulvérisé, car il y a certains alliages qui sont ainsi dispersés sans être fondus. On pourrait citer de nombreux exemples de ces effets de fusion sur les pointes de platine et sur les baguettes de laiton qui les soutiennent; on pourrait citer aussi plusieurs exemples de conducteurs en câbles de laiton qui ont été brisés et projetés.

Après avoir indiqué les conditions sous lesquelles un paratonnerre est efficace, et les dangers qu'il y a à négliger ces conditions, il nous reste à faire savoir comment on peut les remplir dans la pratique.

L'Académie des sciences s'est occupée à plusieurs reprises de cette importante question : en 1823, elle avait approuvé un rapport de Gay-Lussac sous le titre d'*Instruction sur les paratonnerres;* en 1854 et 1855, elle a pareillement approuvé divers rapports que j'ai été chargé de lui faire sous le titre de *Supplément à l'instruction sur les paratonnerres;* elle a de plus décidé que ces rapports, réunis à l'instruction de 1823, seraient publiés en un petit volume, pour être mis à la disposition du public. C'est de cette instruction pratique, adoptée par l'Académie, que je vais extraire les indications générales qui me semblent de nature à trouver ici leur place.

La tige d'un paratonnerre a environ 9 mètres de longueur; elle se compose habituellement de trois pièces ajoutées bout à bout, savoir :

Une barre de fer de...........	$8^m,60$
Une baguette de laiton de......	$0^m,60$
Une aiguille de platine de......	$0^m,05$

Leur ensemble forme un cône ou une pyramide qui s'amincit

Digitized by Google

régulièrement jusqu'au sommet, et dont la base a 5 centimètres de diamètre (Pl. 48, Fig. 24).

L'aiguille de platine est soudée à la baguette de laiton avec de la soudure d'argent, et l'on enveloppe encore cette jonction avec un petit manchon de cuivre *m* (Fig. 26).

La baguette de laiton se réunit à la barre de fer au moyen d'un goujon *g*, qui entre à vis dans toutes deux (Fig. 24) ; ce goujon est ensuite fixé dans chacune par deux goupilles à angle droit.

La barre de fer est quelquefois composée de deux parties pour la facilité du transport ; alors, ces deux parties s'emboîtent exactement par un tenon pyramidal de 20 centimètres de longueur ; une clavette *c*, qui les traverse, les maintient fortement unies.

Pour ajuster la tige au-dessus du bâtiment, on perce le toit, et on la fixe avec des brides ou des étriers solides, soit contre un poinçon, soit contre le faîtage : on ne doit s'occuper qu'à lui donner de la solidité, et à empêcher l'eau de s'infiltrer ; il n'y a aucune précaution à prendre qui soit relative aux effets de l'électricité. On en voit trois dispositions (Fig. 29).

Au bas de la tige, à 8 centimètres du toit, on soude une embase *bb'* destinée à rejeter l'eau.

Un peu au-dessus de l'embase, dans une longueur de 5 centimètres, la tige est cylindrique et parfaitement rodée pour recevoir un collier *ll'* brisé à charnière (Fig. 25), qui doit unir la tige au conducteur.

Le conducteur est une barre de fer carrée de 15 à 20 millimètres de côté, qui se fixe au collier *ll'* au moyen du boulon *nn'*, et qui descend ensuite jusqu'au sol ; les diverses pièces qui le composent sont assemblées comme on le voit dans la figure 27. Quelquefois, au lieu d'une barre de fer, on emploie un câble en fil de fer ou de cuivre d'une longueur convenable, et alors il s'ajuste au collier, comme on le voit (Fig. 28).

Pour que le poids du conducteur ne porte aucun dommage à la couverture, on le fixe sur des pattes de 3 en 3 mètres de distance, et à peu près à 15 centimètres d'élévation ; arrivé à la corniche, on le courbe convenablement pour qu'il en prenne le contour sans la toucher (Fig. 29), puis on l'applique contre le mur ; on peut l'y fixer avec des crampons de distance en distance, et on l'amène jusqu'au réservoir commun conformément à la quatrième règle qui est indiquée un peu plus loin.

Digitized by Google

Telles étaient les dispositions primitives, mais nous allons rendre compte de quelques modifications qu'il a paru nécessaire d'y introduire; en même temps nous développerons un certain nombre de règles pratiques qui s'en déduisent.

Nous avons dit que le paratonnerre doit être continu depuis la pointe de la tige jusqu'au réservoir commun.

« Mais il faut bien expliquer ce que doit être cette continuité, car on peut, à la rigueur, l'entendre de deux manières : on peut admettre que deux pièces de métal qui se touchent forment un ensemble assez continu pour l'électricité; on peut admettre, au contraire, que le plus souvent ce simple contact est l'équivalent d'une lacune, à cause de l'oxydation qui se produit avec le temps et des corps étrangers qui se déposent entre les surfaces.

« L'Instruction de 1823, sans avoir adopté la première opinion, nous paraît n'avoir pas assez recommandé la seconde, qui, à notre avis, doit être exclusivement mise en pratique dans tout ce qui appartient aux paratonnerres.

« Nous ne nierons pas, sans doute, qu'en multipliant les précautions et les soins, on ne puisse parvenir à joindre et à boulonner deux pièces de fer ou de cuivre assez étroitement pour qu'elles offrent au fluide électrique un assemblage véritablement continu; mais quand les joints doivent se multiplier, nous craignons quelques négligences des ouvriers, et par-dessus tout nous craignons les altérations chimiques des surfaces, les dépôts des diverses matières étrangères, enfin les dislocations mécaniques qui se produisent aussi avec le temps et par des secousses répétées. En conséquence, nous regardons comme indispensables les deux règles pratiques suivantes :

« *Première règle.* — Réduire autant que possible le nombre des joints sur la longueur entière du paratonnerre, depuis la pointe jusqu'au réservoir commun.

« *Deuxième règle.* — Faire au moyen de la soudure à l'étain tous ceux de ces joints qu'il est nécessaire de faire sur place, soit à cause de la forme, soit à cause de la longueur des pièces.

« Ces soudures à l'étain, qui devront toujours se faire sur des surfaces ayant au moins 10 centimètres carrés, seront en outre consolidées par des vis, des boulons ou des manchons.

« Ces précautions nous semblent commandées par la prudence, surtout pour les édifices où il entre beaucoup de métal.

Digitized by Google

pour ceux qui sont placés sur un vaste sol bon conducteur, enfin pour les bâtiments de mer; parce que ce sont là, comme nous l'avons dit, les conditions qui donnent, pour un même nuage orageux, les flux électriques les plus considérables.

« *Troisième règle.* — Une troisième règle, à laquelle nous attachons aussi de l'importance, est de ne pas amincir autant qu'on le fait, en général, le sommet de la tige du paratonnerre. A notre avis, l'extrémité supérieure du fer ne doit pas avoir moins de 3 centimètres carrés de section; par conséquent 2 centimètres de diamètre; on y fera à la lime et dans l'axe un cylindre ayant 1 centimètre de diamètre et 1 centimètre de hauteur, qui sera ensuite taraudé; sur cette vis saillante on adaptera un cône de platine de 2 centimètres de diamètre à la base et d'une hauteur double, c'est-à-dire de 4 centimètres; l'angle d'ouverture à la pointe aiguë étant ainsi de 28 à 30 degrés; ce cône de platine, d'abord plein, sera creusé et taraudé pour faire écrou sur la vis, ensuite il sera soigneusement soudé au fer, à la soudure forte, pour composer avec lui un tout continu et sans vides (*Instruction de* 1855, page 96).

« Cependant le platine ainsi que l'or et le palladium qui pourraient le remplacer sont des métaux d'un prix élevé, de plus bien peu d'ouvriers ont l'habitude de les travailler, ou du moins d'apporter à ce travail la précision et les soins délicats qui sont ici la condition indispensable du succès. Ces motifs nous ont ramené à une proposition qui avait déjà été discutée dans le sein de la première commission et qui consiste à faire simplement la pointe des paratonnerres avec du cuivre rouge. A cet effet un cylindre de cuivre rouge de 2 centimètres de diamètre, comme la partie supérieure de la tige de fer du paratonnerre, est brasé avec elle pour en faire le prolongement; sa longueur est d'environ 20 centimètres, et il se termine en haut par un cône de 3 à 4 centimètres de hauteur.

« Notre conclusion, à l'égard de cette pointe de cuivre rouge, est que rien ne s'oppose à ce qu'elle soit employée presque avec la même confiance que les précédentes; si l'on peut craindre qu'elle n'éprouve quelques altérations superficielles de la part des agents atmosphériques, ces inconvénients possibles sont plus que compensés par les avantages suivants :

« 1° Le cuivre rouge, tel qu'on le trouve dans le commerce, est, avec le palladium, l'or et l'argent, parmi les meilleurs

conducteurs de la chaleur et de l'électricité; la pointe du cône de ce métal s'échauffera donc beaucoup moins que celle du cône de platine sous l'influence des courants électriques et même des coups de foudre; ainsi, avec la forme que nous lui donnons, il est probable qu'elle ne sera ni fondue ni profondément oxydée.

« 2° Le paratonnerre à pointe de cuivre rouge n'entraîne qu'à une moindre dépense; il devient accessible, non-seulement aux communes, mais à la plupaut des propriétaires; il peut être fabriqué partout, car il y a sans doute en France bien peu de villages où l'on ne trouve un ouvrier fort capable de travailler et d'ajuster toutes les pièces d'un paratonnerre établi d'après ce système (*Instruction de* 1855, page 126).

« Indiquons les raisons de ce changement.

« Quelque grand que soit un nuage orageux, quelque considérable que puisse être son intensité électrique, il est certain que, s'il était assez loin du paratonnerre et que s'il s'en approchait assez lentement, il n'y aurait aucune explosion de la foudre : le paratonnerre exercerait d'une manière efficace son *action préventive;* sans neutraliser complétement la puissance électrique du nuage, il la réduirait dans une énorme proportion; et, dans ce cas, il ne protégerait pas seulement un cercle restreint autour de lui, il aurait de plus protégé par anticipation, dans une certaine mesure, tous les objets au-dessus desquels ce nuage doit passer dans sa course ultérieure. C'est pour augmenter encore cette action préventive si remarquable que nous donnons au paratonnerre, dans toute sa longueur, cette continuité métallique absolue qui la favorise à un haut degré. La pointe aiguë d'un angle de 30 degrés que nous substituons à la pointe aiguë et beaucoup plus effilée dont on se sert généralement, n'empêche pas cette action, bien qu'elle soit moins propre à la favoriser quand les distances sont petites et les intensités faibles; mais elle a une incontestable supériorité par la résistance incomparablement plus grande qu'elle oppose à la fusion, résistance que nous jugeons nécessaire.

« En effet, il faut bien se poser cette question : Un bon paratonnere peut-il être foudroyé, à la manière d'un mauvais paratonnerre, à la manière des autres objets terrestres, c'est-à-dire par un éclair, par une explosion soudaine? Or, à cette question nous ne trouvons dans les faits jusqu'à présent connus

Digitized by Google

rien qui nous autorise à faire une réponse négative absolue. Nous dirons seulement que ce phénomène, s'il se produit, ne peut se produire que sous la condition qu'une force électrique considérable se développe subitement dans le voisinage du paratonnerre. C'est là tout ce que nous pouvons déduire aujourd'hui des lois encore imparfaitement connues de l'électricité atmosphérique ; et il n'est pas impossible que cette condition se trouve quelquefois remplie, soit par les actions multiples et diverses qui s'exercent entre des nuages différents, soit par des condensations rapides, analogues à celles qui donnent tout à coup des masses d'eau ou de grêle, soit enfin par d'autres causes dont notre ignorance actuelle ne nous permet pas d'apercevoir l'origine.

« Ce phénomène, nous n'en doutons pas, sera très-rare et, si l'on veut, tout à fait exceptionnel ; mais il suffit qu'il ne soit pas impossible pour que nous en tirions cette conséquence pratique : qu'il est indispensable de constituer le paratonnerre, non-seulement pour qu'il ne soit pas détruit par la foudre, mais encore pour qu'il n'en puisse éprouver aucun dommage capable d'affaiblir sa puissance protectrice.

« La pointe mince et effilée ne remplit pas cette condition ; car il ne faut pas un coup de foudre bien vif pour qu'elle soit émoussée, ou même pour que la tige qui la porte soit ramollie à un tel point que, par son poids, elle se courbe en forme de crosse, et s'il arrive que le coup soit violent, la pointe et une longueur plus ou moins considérable de la tige tombent en globules enflammés. Après de tels accidents, si le conducteur lui-même n'a reçu aucune atteinte, il est vrai que le paratonnerre n'est pas précisément hors de service, mais il est certain aussi qu'il a perdu tout l'avantage que l'on avait recherché en lui donnant une pointe à angle très-aigu. Un appareil ainsi dégradé reste encore très-propre à recevoir d'autres coups de foudre et à protéger autour de lui dans un certain rayon, mais il est devenu impropre à exercer aucune action préventive, puisque le sommet de la tige n'est plus qu'une masse informe recouverte d'une couche épaisse d'oxyde.

« Dans ses deux états il représente les deux opinions extrêmes qui, à diverses époques, ont été émises sur les paratonnerres ; avant le coup de foudre il représente l'opinion de ceux qui demandent exclusivement au paratonnerre une action préventive ;

Digitized by Google

après le coup de foudre il représente l'opinion de ceux qui, ne comptant pour rien l'action préventive, demandent seulement que le paratonnerre puisse être foudroyé sans dommage. Nous ne prétendons pas donner satisfaction à tout le monde, mais nous avons la ferme confiance qu'il est possible de constituer un paratonnerre qui résiste parfaitement aux plus violents coups de foudre et qui possède, après comme avant, une action préventive très-efficace.

Quatrième règle. « Quant à la communication des conducteurs avec le réservoir commun, nous la recommandons de nouveau, avec tous nos prédécesseurs, comme une condition absolue qu'il faut remplir à tout prix. Nous ajouterons même sur ce point deux observations qui nous semblent nécessaires.

« Premièrement, dans les plus anciennes instructions sur les paratonnerres, il est dit que les conducteurs doivent communiquer avec les eaux d'une rivière, d'un étang, d'un puits ou du moins avec la terre humide. Cette règle, très-exacte en elle-même, devient souvent fausse dans les applications de ce que l'on en fait. Quelquefois on s'imagine que le *feu du ciel* s'éteint avec de l'eau de la même manière que le feu d'un incendie, et, si l'eau est rare, on se tire d'affaire en l'enfermant dans une citerne bien étanche pour y plonger les conducteurs, croyant ainsi avoir largement satisfait aux règles de la science. C'est là une erreur des plus dangereuses : le conducteur doit communiquer avec le réservoir commun, c'est-à-dire avec de vastes nappes d'eau ayant une étendue beaucoup plus grande que celle des nuages orageux; l'eau deviendrait elle-même foudroyante, si elle n'avait pas une étendue suffisante. D'autres fois, dans les localités où les puits sont possibles, mais coûteux, on profite de l'alternative laissée par les instructions : au lieu de faire un puits, on met les conducteurs en communication avec la terre humide, mais on ne s'inquiète pas de savoir si cette terre conserve une humidité suffisante aux temps des grandes sécheresses, quand les orages sont le plus à craindre; on ne s'inquiète pas non plus de savoir si cette couche humide est assez vaste pour ne laisser place à aucun danger. Nous signalerons surtout cette seconde erreur, parce qu'elle nous paraît être plus commune encore que la première. Considérant d'ailleurs qu'il est fort difficile de reconnaître si une terre humide satisfait à toutes les conditions de sécurité, nous n'hésitons pas à dire qu'il ne faut

Digitized by Google

jamais recourir à ce mode de communication avec le réservoir commun; nous recommandons, à défaut de rivières ou de vastes étangs, de mettre toujours les conducteurs des paratonnerres en communication par de larges surfaces avec des nappes d'eau souterraines intarissables. Ce mode exclusif présente aujourd'hui d'autant moins d'inconvénients, que les pratiques du sondage sont devenues faciles et peu dispendieuses.

« Secondement, dans certaines circonstances, et surtout quand les nappes d'eau sont à une profondeur un peu considérable au-dessous du sol, nous regardons comme nécessaire d'employer un *conducteur à deux branches :* la *branche principale*, qui descend à la nappe souterraine, et la *branche secondaire*, qui, en partant de celle-ci rez-terre, est mise en communication avec la surface du sol elle-même. Voici les motifs de cette disposition. Après les grandes sécheresses, les nuages orageux n'exercent leur influence que très-faiblement sur un sol sec et mauvais conducteur, toute l'énergie de leur action se fait sentir à la nappe d'eau profonde : c'est là que la décomposition électrique s'accomplit, et l'électricité attirée vient en suivant la branche principale du conducteur pour s'écouler par la pointe; la branche secondaire est sans effet. Au contraire, après une pluie d'été, quand le sol vient d'être mouillé, sa couche superficielle est tout à coup rendue conductrice : alors c'est elle qui reçoit l'action des nuages orageux, en même temps elle fait l'office d'un écran qui empêche l'influence électrique de se faire sentir à la nappe souterraine. Dans un tel moment, il est indispensable que la surface du sol communique elle-même directement avec le conducteur, car il peut bien arriver qu'elle n'ait pas avec lui des communications indirectes suffisantes au moyen de la nappe souterraine. La branche secondaire remplit cette condition, tandis que cette fois la branche principale devient inactive.

« Cette seconde observation est peu applicable au sol de Paris, surtout vers les bords de la Seine où l'eau des puits est, sans aucun doute, en bonne communication avec celle de la rivière, et, par conséquent, en bonne communication avec les rues quand elles sont mouillées par la pluie (*Instruction de* 1855, p. 113).

Cinquième règle. « Quand la tige du paratonnerre est environnée de corps très-bons conducteurs, de charpentes en fer ou des couvertures métalliques d'une grande étendue, ces corps conducteurs, quoique placés plus bas que la tige, éprou-

veraient néanmoins une grande décomposition dans leurs électricités naturelles, et par cela même ils pourraient être frappés de la foudre.

« Le seul remède qui se présente pour les protéger consiste à les mettre en bonne communication soit avec la tige soit avec le conducteur du paratonnerre, car, au moyen de cette communication, les deux fluides contraires pourront s'écouler à mesure qu'ils seront décomposés : celui qui est repoussé s'écoulera dans le sol par le conducteur lui-même ; celui qui est attiré gagnera le sommet de la tige, et pourra s'écouler librement vers le nuage par l'extrémité de la pointe.

« Cette théorie si simple condamne comme dangereuse l'invention de quelques praticiens, qui se sont imaginé que, sur les édifices à charpente métallique, il fallait soigneusement isoler de cette charpente et la tige et toute l'étendue du conducteur du paratonnerre. Heureusement, les moyens qu'ils emploient pour obtenir cet isolement sont trop imparfaits pour atteindre leur but ; et, s'ils n'arrivent pas à faire une chose dangereuse, ils font au moins une chose inutile. La théorie veut que l'on fasse précisément le contraire, c'est-à-dire que l'on mette en communication avec le paratonnerre tous les bons conducteurs d'une grande étendue qu'il doit protéger.

« Pour le surplus, nous renvoyons à l'Instruction de 1823, car il n'est venu à notre connaissance aucun fait qui conduise à modifier les règles principales qu'elle propose :

« 1° Pour la section des conducteurs, qu'elle fixe à $2^{cq},25$ (2 centimètres carrés et un quart), c'est-à-dire à 15 millimètres de côté pour le fer carré et 17 millimètres de diamètre pour le fer rond ;

« 2° Pour la manière d'établir les conducteurs sur les couvertures des divers édifices.

« Après avoir examiné tout ce qui appartient à la construction et à la pose du paratonnerre, le sujet qui nous occupe n'est pas épuisé ; il reste encore une question importante et difficile à résoudre : c'est la question de savoir à quel point il faut multiplier les paratonnerres, ou, en d'autres termes, quel est le *cercle de protection* qu'il est permis d'attribuer à un paratonnerre bien établi.

« Quelques anciennes observations paraissent avoir constaté des coups de foudre sur des parties de bâtiments qui se trou-

Digitized by Google

vaient à une distance de la tige égale à trois ou quatre fois sa hauteur au-dessus de leur niveau. En conséquence, à la fin du siècle dernier, c'était une opinion généralement reçue, que le cercle de protection du paratonnerre n'avait pour rayon que deux fois la hauteur de la tige. L'Instruction de 1823 ayant trouvé cette pratique établie, a cru devoir l'adopter. Cependant elle y apporte quelques restrictions : par exemple, en ce qui regarde les paratonnerres des clochers, elle admet, s'ils s'élèvent de 30 mètres au-dessus du comble des églises, que, pour ces combles, le rayon du cercle de protection se réduit à 30 mètres, au lieu de 60.

« Il importe de rappeler que ces règles, bien qu'elles soient appliquées depuis longtemps, reposent sur des bases où il entre beaucoup d'arbitraire; et, si nous faisons cette remarque, ce n'est pas pour les condamner, mais seulement pour empêcher qu'on ne leur attribue une valeur qu'elles sont loin d'avoir. Ne suffirait-il pas, en effet, que, d'époque en époque, elles fussent ainsi admises traditionnellement et de confiance pour que l'on se crût dispensé de les soumettre à quelque contrôle, pour que l'on négligeât de faire sur ce point des observations qui pourraient se présenter et qui fourniraient à la science des documents qui lui manquent presque complétement?

« Ce n'est qu'avec ces réserves et faute de données assez nombreuses et assez certaines que nous admettons ces règles reçues sur la grandeur du cercle qu'un paratonnerre protége autour de lui. Nous ajouterons de plus, pour ceux qui pourront observer des faits qui s'y rapportent, qu'elles ne peuvent pas être générales et absolues; qu'elles dépendent d'une foule de circonstances, et particulièrement des matériaux qui entrent dans les constructions. Nous croyons, par exemple, que le rayon du cercle de protection ne peut pas être aussi grand pour un édifice dont les couvertures ou les combles sont en métal que pour un édifice qui n'aurait, dans ses parties supérieures, que du bois, de la tuile ou de l'ardoise. En effet, dans ce dernier cas, la portion active du nuage orageux, quoique notablement plus éloignée du paratonnerre que de la couverture, exerce cependant sur le paratonnerre une action plus vive; tandis que, dans le premier cas, ces deux actions doivent être à peu près égales pour une distance égale.

« En terminant ici le développement de ces principes géné-

raux, nous profiterons de l'occasion qui nous est offerte pour appeler de nouveau l'attention sur tout ce qui se rattache aux effets de la foudre et sur la nécessité de les bien observer. Chaque fois que le tonnerre tombe, près ou loin des paratonnerres, près ou loin des habitations, dans les plaines ou sur les montagnes, il est presque certain qu'il y a des observations importantes à faire sur les phénomènes qui se manifestent. On connaît, il est vrai, un grand nombre, malheureusement un trop grand nombre d'exemples de personnes tuées ou de maisons incendiées; on connaît aussi des exemples très-divers de métaux fondus, de charpentes brisées, de pierres ou même de murailles transportées au loin, enfin beaucoup d'autres effets analogues; mais ce qui manque, en général, ce sont des mesures précises relatives aux distances, aux dimensions, aux positions des objets, soit des objets atteints, soit de ceux qui ne le sont pas: car il faut connaître aussi bien ce que le tonnerre épargne que ce qu'il frappe. C'est à tous les observateurs, et particulièrement aux officiers de la marine, de l'artillerie et du génie, aux professeurs, aux ingénieurs, aux architectes, qu'il appartient de bien constater ces phénomènes au moment même où ils se produisent, et de les bien décrire, au profit de la science comme au profit de l'économie publique. De telles descriptions, quand elles se rapportent à un coup de foudre, doivent, autant que possible, indiquer les traces de la foudre à son point le plus haut et à son point le plus bas; ensuite, par des sections horizontales bien repérées et assez multipliées, faire connaître les positions relatives de tous les objets dans un cercle assez étendu autour de ceux qui portent la marque de son passage.

« L'Académie des sciences recevra toujours des travaux de cette espèce avec un véritable intérêt (*Instruction de* 1855, p. 104).

Digitized by Google

CHAPITRE V.

Du magnétisme terrestre.

308. Les phénomènes du magnétisme terrestre, considérés dans leur ensemble, sont rentrés dans la météorologie lorsqu'il est arrivé, par les découvertes modernes, que la météorologie est devenue elle-même la physique du globe, c'est-à-dire la science qui a pour objet de déterminer les lois des forces naturelles qui exercent leur action d'une manière générale sur les divers points du globe de la terre. Parmi ces forces, celle du magnétisme se distingue de toutes les autres par des caractères remarquables : la pesanteur, l'électricité et la chaleur semblent agir de concert pour produire les plus grands bouleversements qui puissent ébranler notre planète ; la lumière, au contraire, tout en développant les phénomènes les plus admirables et les plus variés, n'exerce jamais la moindre agitation dans la matière, et le magnétisme, destiné en quelque sorte à un rôle intermédiaire, ne semble pouvoir se manifester à nous que par les mouvements toujours lents, réglés et périodiques, qu'il imprime aux aiguilles de nos boussoles.

Renfermés dans un cercle assez restreint, les phénomènes magnétiques se présentent cependant sous des apparences si prodigieusement variées, avec des caractères si difficiles à saisir, à définir et à généraliser, qu'à eux seuls ils suffiraient encore pour exercer sans doute, pendant bien des siècles, l'infatigable zèle des physiciens.

Nous ne pouvons pas entreprendre d'exposer ici tout ce qui est connu sur le magnétisme terrestre, de discuter tous les faits, toutes les hypothèses, tous les procédés d'observation ; mais nous essayerons du moins de résumer en peu de mots les résultats généraux les mieux établis, et d'indiquer les questions qui, dans l'état actuel de la science, semblent attendre les solutions les plus prochaines.

Ce chapitre se divise en six paragraphes : 1° *déclinaison ;* 2° *variations diurnes ;* 3° *inclinaison*, *équateur magnétique et*

pôles magnétiques; 4° *intensité;* 5° *considérations théoriques et formules générales;* 6° *aurores boréales.*

Nous n'avons à revenir, ni sur les premières notions de ces phénomènes, ni sur la description des appareils qui servent à les observer : nous avons donné à ce sujet des détails suffisants dans le premier volume (liv. III, chap. II).

§ 1. *Déclinaison.*

309. Dans tous les lieux de la terre, la déclinaison subit des variations que l'on pourrait appeler séculaires, parce qu'elles s'accomplissent progressivement dans le même sens pendant un très-grand nombre d'années. Le tableau des déclinaisons de Paris (t. I) nous montre en effet que depuis 1580 jusqu'en 1814, c'est-à-dire pendant environ deux siècles et demi, la déclinaison a marché vers l'ouest de trente et quelques degrés; non pas, il est vrai, avec une vitesse uniforme et régulière, mais d'un mouvement brusque, saccadé, incertain et quelquefois même rétrograde. Depuis 1814, la déclinaison n'a éprouvé que de faibles variations pendant 12 ou 15 ans; elle avait atteint, non pas une valeur désormais stable ou peu changeante, mais une sorte de limite maximum, d'où elle est partie pour exécuter vers l'orient des mouvements analogues à ceux qu'elle avait exécutés vers l'occident. Ce qui s'est manifesté à Paris pendant près de trois siècles, s'est aussi manifesté avec plus ou moins de force ou d'amplitude dans tous les lieux où il a été permis aux physiciens et aux navigateurs de constater la direction de l'aiguille depuis les époques assez reculées jusqu'à nos temps modernes. Mais les séries séculaires d'observations locales sont trop peu étendues et trop peu nombreuses pour qu'il soit permis dès à présent d'examiner si le mouvement progressif de la déclinaison s'est opéré tout autour du globe de la terre, suivant des lois soumises à quelque régularité. Elles servent seulement à constater le fait en lui-même, comme fait général, qui s'est accompli dans la grande universalité des points de la terre, mais dans des périodes de temps différentes, et avec des conditions de vitesse et d'amplitude pareillement différentes.

On peut donc maintenant se représenter tout autour du globe depuis le pôle boréal jusqu'au pôle austral, sur les mers et sur les continents, les directions actuelles de toutes les aiguilles de

Digitized by Google

déclinaison, et regarder comme un fait acquis à la science, que, dans un siècle, toutes ces directions seront changées, les unes vers l'orient, les autres vers l'occident, et le problème qui se présente alors aux physiciens, c'est d'observer ces changements individuels sur un très-grand nombre de points, convenablement répartis dans toutes les régions, sous tous les climats; de constater à des époques assez rapprochées leur amplitude; le sens dans lequel ils s'accomplissent, et leurs périodes directes ou rétrogrades, en signalant en même temps les causes perturbatrices ou locales qui peuvent exercer quelque influence. Ces données, qui exigent tant de zèle, tant d'exactitude et un travail si persévérant, sont des éléments nécessaires qui doivent s'ajouter à d'autres non moins indispensables, dont nous parlerons plus loin; ce n'est qu'après avoir recueilli toutes ces observations qu'il sera possible d'établir sur leurs véritables bases les lois générales du magnétisme terrestre. Pour faciliter ces recherches et surtout les comparaisons que l'on est sans cesse obligé de faire entre les déclinaisons des différents lieux, nous avons réuni dans le tableau qui termine ce chapitre, pour l'hémisphère occidental à partir du méridien de Paris, et pour l'hémisphère oriental, toutes les déclinaisons de 5 en 5 degrés de latitude et de longitude. Ce tableau correspond à l'année 1825; il a été composé presque exclusivement au moyen des belles cartes que M. le capitaine Duperrey a publiées en 1836. Tous les physiciens savent maintenant avec quelle sagacité ce savant et habile marin a discuté toutes les observations qui avaient été faites à cette époques. Les opérations graphiques auxquelles il a fallu recourir pour relever les courbes de M. Duperrey et les intercalations qui sont devenues nécessaires pour ramener les déclinaisons à des degrés justes de latitude et de longitude, ne permettent pas de regarder notre tableau comme parfaitement exact, surtout pour les latitudes élevées. Cependant, malgré les incertitudes qu'il peut offrir sur plusieurs points, il m'a semblé qu'il pourrait être d'un grand secours pour l'étude du magnétisme. On y remarque des irrégularités qui pourront paraître choquantes; on verra, par exemple, sur un même méridien ou sur un même parallèle, des déclinaisons qui ne paraissent aucunement soumises à la loi de continuité; mais elles ne doivent pas cependant être prises pour des erreurs; la plupart ont été vérifiées sur la carte elle-même et sur les documents originaux, quand il a été possible.

La région qui présente les singularités les plus frappantes est celle qui se trouve comprise entre le 40^e et le 70^e degré de latitude boréale, et entre le 110^e et le 140^e degré de longitude orientale. Ce grand espace qui occupe les deux versants des monts Doourie et Stanovoy, qui comprend au sud le bassin du fleuve Amour et au nord le bassin du fleuve Léna, forme en quelque sorte une île isolée où les déclinaisons se portent vers l'occident, tandis que tout autour elles paraissent se porter vers l'orient. Cette région, il est vrai, est encore peu explorée; mais elle doit fixer particulièrement l'attention des voyageurs et des physiciens; il faut savoir à quoi s'en tenir sur un fait aussi singulier.

Quelques physiciens semblent attacher une grande importance à tracer sur le globe les *lignes sans déclinaison* pour une époque donnée, et à suivre les mouvements et les inflexions qu'elles prennent à diverses époques; mais il est difficile que ces lignes, considérées isolément, puissent conduire à quelque résultat général : leur déplacement est, sans aucun doute, lié d'une manière intime à tous les autres changements de déclinaison qui s'accomplissent autour du globe, et c'est par l'ensemble seul de tous ces changements qu'il sera permis un jour de reconnaître si les changements de déclinaison sont réellement périodiques, si la durée de la période varie d'un lieu à l'autre, et s'il est possible de rapporter à une cause unique et générale, les amplitudes des changements de déclinaison des différents lieux pour un intervalle de temps donné, ou s'il faut les attribuer à des forces différentes, exerçant des actions locales plus ou moins étendues et plus ou moins profondes. Si, par exemple, les déclinaisons étaient troublées sur un hémisphère sans l'être en même temps sur l'autre, il faudrait bien en conclure que la force directrice, au lieu d'être unique et d'avoir son centre d'action près du centre de la terre, se trouve, au contraire, être une force multiple dont les centres d'action sont pour chaque lieu assez voisins de la surface pour n'affecter sensiblement que les aiguilles qui sont les plus rapprochées d'elle. Cette question est fondamentale, et, jusqu'à présent, elle ne me semble point résolue par l'ensemble des faits connus. Il est peut-être même permis de dire que, contrairement aux opinions reçues, beaucoup de faits semblent indiquer que, pour chaque région, le centre d'action du magnétisme terrestre est à une distance assez considérable du centre de la terre.

Digitized by Google

§ 2. *Variations diurnes.*

310. Nous avons indiqué (t. I) le caractère général des variations diurnes, du moins pour l'hémisphère boréal; nous devons ajouter ici que l'influence des saisons sur l'heure précise et sur l'étendue de ces variations n'est pas également bien constatée pour tous les points de cet hémisphère. Il faut encore de longues séries d'observations pour démêler en chaque lieu toutes les forces qui concourent à ce phénomène. Cependant, une question importante paraît être résolue par les travaux de divers expérimentateurs, et surtout par ceux des officiers de *la Vénus;* c'est la question de savoir si les variations diurnes sont les mêmes sur les côtes orientales et sur les côtes occidentales d'un même continent. On comprend qu'il y a là une donnée essentielle pour l'explication du phénomène; car il y a une telle liaison entre le mouvement du soleil et les mouvements diurnes de l'aiguille, qu'il eût été assez naturel de rapporter ces derniers à quelques changements de température dans les couches superficielles du sol; et, comme les eaux et les continents se trouvent à cet égard dans des conditions tout à fait différentes, les aiguilles placées sur les côtes orientales et occidentales ne pourraient guère, sans doute, présenter les mêmes variations. Or, les officiers de *la Vénus* ont observé à *Pétropauloskoi*, sur la *côte occidentale* du *Kamtschatka*, quant aux heures et aux amplitudes, les mêmes mouvements diurnes qu'on aurait observés sur la côte *orientale*. L'inégale distribution de la chaleur, à droite et à gauche du méridien magnétique, ne paraît donc pas exercer une influence sensible sur les variations diurnes de l'aiguille aimantée.

Les mêmes officiers ont aussi constaté dans l'hémisphère austral, au Callao, sur les côtes du Pérou, un fait important, déjà signalé par M. Gay, et mis par lui tout à fait hors de doute sur plusieurs points de la côte du Chili, et particulièrement à Valdivia, par une année entière d'observations. Dans ces parages, l'aiguille a, pendant le jour, trois temps d'arrêt, ou une double oscillation: le matin, elle marche à l'est; dans le milieu de la journée, elle rétrograde vers l'ouest, puis, dans la soirée, en partant de trois ou quatre heures de l'après-midi, elle reprend son mouvement vers l'est (*Comptes rendus*, t. II, p. 330, et t. II, p. 329). Aucun phénomène pareil n'a été observé, jusqu'à présent, dans l'hémisphère boréal.

Digitized by Google

Avant que ce fait fût bien établi, on avait pensé que les variations diurnes australes étaient analogues aux variations boréales pour les heures et les amplitudes, mais contraires pour le sens du mouvement; et l'on était ainsi conduit à cette conséquence, qu'il devait exister quelque part dans la zone équatoriale, soit près de l'équateur terrestre, soit près de l'équateur magnétique, une ligne sans variations diurnes, car il est impossible de passer d'un mouvement à un mouvement contraire sans un point de repos. Maintenant, sans perdre de vue cette conséquence, il faut chercher cette ligne de repos, si elle existe, ses déplacements annuels ou séculaires, si elle en offre; mais en même temps il faut examiner l'étendue et les limites géographiques de ce mouvement diurne à double oscillation, en constater toutes les circonstances par rapport aux saisons et aux conditions géologiques et hydrographiques, et chercher enfin *s'il ne* serait pas lui-même un mode particulier du passage de l'hémisphère boréal à l'hémisphère austral, sur une certaine zone dont il faudrait déterminer la position par rapport à l'équateur terrestre ou à l'équateur magnétique.

On voit que les variations diurnes ne présentent pas à nos recherches un sujet moins vaste que les déclinaisons elles-mêmes, et que ce sujet se complique de circonstances nouvelles très-extraordinaires.

Quant à la cause qui produit ces mouvements, on ne sait pas, jusqu'à présent, si elle est une force secondaire ou perturbatrice mise en jeu accidentellement sous l'influence de la chaleur, de la lumière ou du rayonnement solaire, ou si elle est *la force* magnétique elle-même, éprouvant intégralement, dans sa direction et son intensité, des modifications journalières qui changent périodiquement ses effets sur l'hémisphère éclairé de la terre : car les aiguilles peuvent bien éprouver des perturbations pendant la nuit; mais en général elles n'éprouvent pas des variations aussi sensibles, aussi régulières que pendant le jour. Nous devons remarquer toutefois que cette distinction ne s'applique pas également à toutes les théories du magnétisme terrestre, puisque dans la théorie des courants, soit profonds, soit superficiels, la cause perturbatrice se confondrait aisément avec la cause générale.

Les variations diurnes sont particulièrement affectées par les aurores boréales, comme nous le verrons (§ 6); mais il ne paraît pas que les tremblements de terre, qui agissent quelquefois sur

Digitized by Google

la déclinaison elle-même, puissent déranger la régularité du mouvement diurne autrement que par une simple action mécanique. Ce fait a été encore confirmé récemment dans le voyage de *la Vénus*, puisque la marche diurne de l'aiguille n'a pas été altérée à *Acapulco*, sur la côte occidentale du Mexique, par les tremblements de terre fréquents qui se faisaient sentir à une assez petite distance sur toute la côte orientale.

§ 3. *Inclinaison.*

311. L'inclinaison semble avoir, pour chaque point de la terre, un mouvement progressif comme la déclinaison; mais, d'après le tableau que nous avons donné pour Paris (t. 1), on voit que rien encore ne semble indiquer que ce mouvement approche du terme où il doive se ralentir sensiblement, soit pour rester stationnaire, soit pour devenir rétrograde. Il n'y a guère qu'un demi-siècle que l'on sait observer l'inclinaison avec une exactitude suffisante, et dans cet intervalle elle a été continuellement décroissante à Paris; ce relèvement du pôle austral de l'aiguille, d'abord très-irrégulier, a pris peu à peu une marche plus constante, et depuis 1835 il est sensiblement de 3′ par an.

Ce que nous avons dit de la déclinaison s'applique à l'inclinaison. Ce n'est pas en considérant ce qui arrive à Paris ni même en Europe que l'on peut arriver à quelque déduction importante pour la science. Les phénomènes du magnétisme, comme ceux de la distribution de la chaleur, du mouvement de l'atmosphère et de l'équilibre des eaux, appartiennent essentiellement au globe entier de la terre. Sur ces sujets, les observations locales faites avec la plus scrupuleuse assiduité pendant de longues suites d'années, ne peuvent être considérées, en dernier résultat, que comme des points lumineux imperceptibles, qui doivent être accumulés et pressés en nombre infini pour donner une lumière sensible. Il faut donc multiplier de toutes parts des séries d'observations séculaires avant de hasarder sur les lois de ces phénomènes des conclusions qui seraient prématurées; mais comme il n'y a guère d'espoir que tous les pays, même en ne comptant que les plus civilisés, puissent concourir avec le même zèle ou le même succès à des recherches de cette nature, il est bon de suppléer, par des mesures expéditives, aux données qui manqueront infailliblement sur un grand nombre de points. C'est

Digitized by Google

par ces considérations que la science attache une importance particulière à connaître la marche des phénomènes dans telles ou telles régions, qui sont en quelque sorte ses lieux de prédilection. Pour le magnétisme, et surtout pour ce qui regarde l'inclinaison et l'intensité, les régions importantes sont celles de l'*équateur magnétique* et des *pôles magnétiques*. On conçoit en effet que, si l'équateur magnétique était parfaitement connu dans toutes ses sinuosités, qu'il le fût aussi dans tous les déplacements et les déformations qu'il éprouve d'une époque à une autre; que la situation des deux pôles magnétiques et la loi de leurs mouvements fût de même une donnée acquise à la science, il suffirait sans doute de connaître les variations de l'inclinaison, de la déclinaison et de l'intensité sur un nombre de points bien plus restreint, pour découvrir enfin la loi suivant laquelle s'accomplissent tous les changements magnétiques que nous observons.

La direction de l'équateur magnétique a été déterminée dans plus de la moitié de son cours par un assez grand nombre d'expériences. Cette portion la plus étudiée comprend l'océan Atlantique, les côtes orientale et occidentale de l'Amérique et le grand Océan équinoxial, jusqu'au 150ᵉ degré de longitude; puis le grand archipel d'Asie, depuis Bornéo jusqu'au 175ᵉ degré de longitude orientale; mais l'intérieur de l'Amérique, toute l'Afrique et l'océan Indien ne présentent encore qu'un petit nombre d'observations isolées. On voit sur la figure 13 (Pl. 49) la trace de la moitié la mieux connue de l'équateur magnétique, sauf la partie de l'océan Atlantique qui n'a pu être indiquée par ce genre de représentation. Cette carte est due aussi à M. Duperrey; elle est particulièrement destinée à faire voir la position géographique des pôles, et le tracé des courbes qu'on obtiendrait en promenant, à partir de l'équateur terrestre, des boussoles de déclinaison vers chaque pôle, sous la condition qu'en chaque lieu le méridien magnétique fût le point osculateur de la courbe décrite; ou que la direction de l'aiguille de déclinaison fût la tangente de cette courbe. Les lignes irrégulières qui ont été ainsi obtenues par M. Duperrey, de dix en dix degrés de longitude, ont l'avantage de donner à la première vue une idée générale de la déclinaison ou de la trace des méridiens magnétiques d'un pôle à l'autre. Les autres lignes, qui vont de l'est à l'ouest et qui sont perpendiculaires aux premiers, sont celles qu'on obtiendrait avec la boussole d'inclinaison, en la promenant, sous la double condi-

tion qu'en chaque lieu l'aiguille d'inclinaison fût verticale, et que le plan de rotation dans lequel elle peut alors se mouvoir, fût le plan osculateur de la courbe décrite à la surface de la terre. Ces courbes sont en quelque sorte des parallèles magnétiques; mais cependant la discussion des expériences a fait voir qu'elles ne sont ni des courbes d'égale inclinaison, ni des courbes d'égale intensité.

Pour déterminer expérimentalement les positions géographiques des différents points de l'équateur magnétique, on se sert de la formule suivante, sur laquelle nous reviendrons (§ 5) :

$$\text{tang } m = \frac{\text{tang } i}{2}.$$

i est une inclinaison assez voisine de l'équateur magnétique pour ne pas dépasser 25 ou 30°.

m est la *latitude magnétique*, c'est-à-dire l'arc compris entre l'équateur magnétique et la station où l'on observe l'inclinaison i, cet arc étant compté sur le *méridien magnétique* de la station.

Pour fixer sur le globe ou sur la carte un point de l'équateur magnétique, tout se réduit donc à observer au sud ou au nord de l'équateur une inclinaison inférieure à 30°, à déterminer soigneusement la longitude et la latitude terrestres du lieu de l'observation, ainsi que sa déclinaison, à tracer sur la carte le méridien magnétique correspondant, et à prendre sur sa direction un arc égal à la valeur de m donnée par la formule précédente : l'extrémité de cet arc est l'un des points de l'équateur magnétique, dont il est facile alors de déterminer les coordonnées géographiques.

Au reste, pour suppléer à ce que la figure 13 ne peut pas représenter, je donne dans le tableau suivant, d'après M. Duperrey, de 10 en 10 degrés de longitude, les diverses latitudes australes ou boréales auxquelles l'équateur magnétique coupe les méridiens terrestres correspondants pour l'année 1824.

HÉMISPHÈRE BORÉAL.		HÉMISPHÈRE AUSTRAL.	
Longitude E.	Latitude N.	Longitude O.	Latitude S.
3° 20'	0° 00'	0° 00'	2° 30'
10 »	3 15	10 »	8 20
20 »	6 45	20 »	10 30
30 »	9 15	30 »	14 40
40 »	10 55	40 »	15 00
50 »	11 50	50 »	15 25
60 »	15 40	60 »	14 40
70 »	10 55	70 »	11 30
80 »	9 30	80 »	8 50
90 »	8 10	90 »	5 35
100 »	7 30	100 »	3 20
110 »	6 30	110 »	2 40
120 »	6 20	120 »	2 35
130 »	6 55	130 »	2 20
140 »	6 45	140 »	2 00
150 »	6 15	150 »	2 00
160 »	3 55	160 »	2 5
170 »	1 10	170 »	0 00
180 »	0 00	180 »	0 00

Les *pôles magnétiques* ne présentent de difficultés dans leur détermination que parce qu'ils se trouvent en quelque sorte rejetés aux extrémités du monde dans des régions inaccessibles ou du moins environnées des plus infranchissables périls. Cependant le capitaine Ross a le premier triomphé de tant d'obstacles, et, dans son mémorable voyage de 1830, il est parvenu à poser sa boussole sur le pôle boréal et à marquer exactement la place qu'il occupait alors sur la surface de la terre. C'est le point qui est marqué sur la figure 13; la longitude était à cette époque de 99° 7' 9" à l'ouest du méridien de Paris, et sa latitude de 70° 5' 17". Les observations que le capitaine Ross a faites à des longitudes très-différentes et presque tout autour du pôle ne peuvent laisser aucun doute sur l'exactitude de cette détermination; il a constaté à la fois les deux caractères qui servent à reconnaître le pôle, la verticalité de l'aiguille d'inclinaison dans tous les azimuts, et l'affolement de l'aiguille de déclinaison, qui n'a plus alors aucune force directrice.

Le *pôle austral*, représenté sur la figure 13, a été déterminé, par M. Duperrey, en combinant les observations circumpolaires et en traçant ses courbes méridiennes, comme nous l'avons dit tout à l'heure. On comprend qu'un résultat ainsi obtenu ne peut

Digitized by Google

pas être à l'abri de toute incertitude; d'après l'opinion de M. Duperrey lui-même, il peut bien être en erreur de quelques degrés, parce que les expériences récentes dans ces parages sont tellement rares, qu'il a fallu recourir à des observations anciennes qui peut-être étaient moins exactes, et qui d'ailleurs ne pouvaient recevoir les corrections convenables pour être ramenées à l'année 1824.

On a fait récemment un grand nombre d'observations pour reconnaître si l'inclinaison change avec la hauteur au-dessus du niveau de la mer, et il paraît en résulter qu'elle éprouve une très-légère diminution : M. de Humboldt l'a trouvée de 2′ pour 260 mètres en opérant à la surface du sol et dans les profondeurs d'une mine, et M. Kupfer a trouvé le même résultat dans son voyage au mont Elbrouss. Ce fait n'est pas sans importance, car, s'il est général, comme on peut le supposer, il conduira sans doute à reconnaître le genre d'influence que peuvent avoir les grandes chaînes et les grands massifs qui forment le relief de la terre.

§ 4. *Intensités.*

312. Nous avons indiqué (t. I) les moyens qui peuvent être employés pour obtenir l'intensité magnétique de la terre, soit qu'on veuille avoir l'intensité horizontale seulement, soit qu'on veuille avoir l'intensité totale, c'est-à-dire, celle qui s'exerce suivant l'aiguille d'inclinaison abandonnée à elle-même dans le plan du méridien magnétique. Nous devons ajouter que les résultats ainsi obtenus doivent subir une correction dépendant de la température; car il est bien établi maintenant que, dans le même lieu et au même instant, la même aiguille fait plus ou moins d'oscillations dans le même temps, suivant qu'elle est à une température plus basse ou plus élevée. Cependant, si cet effet de la chaleur est général, ou presque sans exception, il n'en est pas de même de son intensité, qui, dans les mêmes limites, paraît extrêmement variable, suivant la forme et les dimensions des aiguilles, et peut-être aussi suivant d'autres circonstances qui n'ont pas été suffisamment analysées. Pour ce genre de corrections, la plupart des physiciens adoptent la formule suivante :

$$s = s'[1 - a(t' - t)].$$

Digitized by

s' est le nombre des secondes que l'on a comptées pour 100 ou 200 oscillations à la température t' ; s est le nombre des secondes que l'on aurait comptées à la température t pour le même nombre d'oscillations; a est le coefficient de l'aiguille ; il se détermine d'avance en portant artificiellement l'aiguille à diverses températures connues et comprises entre les limites convenables, et en observant les valeurs correspondantes de s et de s'.

Les voyages autour du monde et ceux qui ont été faits par un très-grand nombre d'observateurs, dans presque toutes les contrées de l'Europe et dans quelques points des continents de l'Asie et de l'Amérique, ont déjà fourni sur l'intensité magnétique de la terre une multitude de résultats intéressants. On a essayé de les discuter et de marquer sur le globe la trace des *lignes isodynamiques* ou d'égale intensité : mais un examen approfondi de cette discussion exigerait beaucoup plus d'espace que je ne puis lui en consacrer ici ; je dois me borner à dire que, d'après nos connaissances actuelles, rien ne paraît plus irrégulier, plus bizarre même, que la marche générale des lignes isodynamiques; on ne peut saisir aucun principe, aucun lien, aucun rapport entre les inflexions brusques et multipliées qu'elles présentent; il n'y a à leur égard aucune règle générale qui ne trouve immédiatement son exception. Ainsi on avait cru d'abord que sur l'équateur magnétique l'intensité était constante, de nouvelles recherches montrent le contraire et semblent indiquer des différences considérables; on avait regardé comme très-certain que l'intensité augmente avec l'inclinaison ou avec la latitude magnétique; plusieurs exemples montrent le contraire, et les observateurs de *la Bonite* ont fait voir qu'à Payta, où l'inclinaison n'est que de 4° 23', l'intensité est plus grande qu'à Cobija, où l'inclinaison est de 24° 13', bien que ces deux points ne soient pas très-éloignés, le premier au nord et le second au sud de l'équateur magnétique, et qu'ils présentent l'un et l'autre des déclinaisons peu différentes. Dans un tel état de choses, on ne peut que multiplier les observations, et y apporter de nouveaux soins pour assurer leur parfaite exactitude.

Les diverses théories du magnétisme terrestre semblent s'accorder pour établir que l'intensité magnétique des pôles doit être double de celle de l'équateur; mais cette déduction elle-même, avant d'être admise comme une conséquence rigoureuse, exige-

rait aussi des vérifications expérimentales plus complètes. La liaison qu'elles établissent entre les intensités correspondant aux diverses latitudes magnétiques est exprimée par la formule suivante, sur laquelle nous reviendrons (§ 5) :

$$r = \sqrt{1 + 3 \sin^2 m},$$

1 étant l'intensité sur l'équateur magnétique, et r l'intensité correspondant à la latitude magnétique m.

Cette formule donne en effet $r = 2$ pour $m = 90°$, qui est à peu près la valeur qu'il faut lui donner pour l'un et l'autre pôle : nous disons *à peu près*, parce que l'équateur étant une courbe irrégulière, les deux pôles ne peuvent pas en être de tous côtés distants de 90°.

On a fait aussi beaucoup de recherches sur la question de savoir si l'intensité diminue à mesure qu'on s'élève sur la même verticale, et l'on a du moins établi ce fait que, s'il y a une diminution, elle est extrêmement faible. En Amérique, l'intensité a été trouvée la même à la chapelle de Guadalupe et à Santa-Fé de Bogota ; aux Pyrénées, M. Forbes annonce une diminution de 1 millième pour 1000 mètres ; dans le Caucase, sur le Kharbis, M. Kupfer annonce une diminution de 1 millième pour 300 mètres. Ces discordances laissent planer encore quelque doute sur le fait lui-même, mais elles n'ont rien cependant qui doive surprendre si l'on réfléchit qu'il y a à tenir compte ici non-seulement des corrections de température, mais encore de la variation diurne de l'intensité elle-même, dont les lois sont inconnues, de la variation diurne de l'inclinaison qui est incertaine, et de la variation non moins incertaine qu'éprouve l'inclinaison à mesure que l'on s'élève.

§ 5. *Discussion de quelques formules.*

313. Nous pouvons maintenant examiner s'il est possible de représenter les phénomènes magnétiques de la terre en supposant qu'ils résultent de l'action unique des deux pôles égaux et contraires situés d'une manière quelconque dans le sein de la terre.

Prenant sur l'axe des x à droite et à gauche de l'origine, et à la distance 1, deux points p et p', l'un représentant un pôle austral, et l'autre un pôle boréal ; les actions de ces points sur une mo-

Digitized by Google

lécule a de fluide austral ayant pour coordonnées x et y, seront $\frac{1}{r^2}$ et $\frac{1}{r'^2}$, en prenant pour unité l'intensité de la distance 1, et en représentant par r et r' les distances de cette molécule aux points p et p'. Ces forces décomposées parallèlement aux axes donneront pour composantes :

$$x = \frac{\cos a}{r^2}, \quad y = \frac{\sin a}{r^2}; \quad x' = \frac{\cos b}{r'^2}, \quad y' = \frac{\sin b}{r'^2},$$

en désignant par a et b les angles que font avec l'axe des x les forces émanées de p et p', ces angles étant comptés comme à l'ordinaire d'après le sens de l'action des forces. Le carré de résultante t sera donné par l'équation

$$t = \frac{1}{r^4} + \frac{1}{r'^4} + \frac{2\cos(a-b)}{r^2 r'^2}.$$

Pour avoir l'intensité sur l'axe des x ou sur la ligne des pôles, il suffit de faire $a = 0$, $b = 180$, ou $a = 180$ et $b = 0$; dans les deux cas $\cos(a-b) = -1$, et l'équation devient :

$$t = \pm\left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r'^2}\right),$$

et, comme $r' = r \pm 2$, il en résulte :

$$t = \pm\frac{4}{r^3},$$

pour le cas où r est très-grand par rapport à l'unité.

Pour avoir l'intensité sur l'axe des y ou sur l'équateur, il suffit de remarquer qu'alors $r = r'$; $\cos(a-b) = \frac{2-r^2}{r^2}$, et la valeur de t devient $t = \pm\frac{2}{r^3}$, c'est-à-dire qu'en supposant r très-grand par rapport à la demi-distance des centres d'actions, l'intensité prise sur la ligne des pôles est, pour une distance égale, double de l'intensité prise sur l'équateur; mais elle n'est double que dans cette hypothèse. On peut remarquer aussi que les intensités sur l'équateur et sur la ligne des pôles décroissent alors comme le cube de la distance.

Si l'on prend l'origine des coordonnées pour le centre d'une circonférence d'un rayon quelconque d, il sera facile d'exprimer

l'intensité en un point quelconque de cette circonférence, au moyen de la distance polaire q, c'est-à-dire au moyen de l'angle q que le rayon correspondant fait avec l'axe des x qui est la ligne des pôles. En effet, on a :

$$r=\sqrt{d^2+1-2d\cos q}, \qquad r'=\sqrt{d^2+1+2d\cos q}.$$

$$2\cos(a-b)=-2\cos pap'=-\left(\frac{r^2+r'^2-4}{rr'}\right).$$

En substituant ces valeurs de r, r' et $\cos(a-b)$, l'expression générale du carré de la résultante devient :

$$t^2=2\left\{\frac{(d^2+1)^2+4d^2\cos^2 q-(d^2-1)\sqrt{(d^2+1)^2-4d^2\cos^2 q}}{[(d^2+1)^2-4d^2\cos^2 q]^2}\right\}.$$

L'intensité à l'équateur étant, d'après ce que nous avons vu tout à l'heure, $\frac{2}{r^3}$ ou $\frac{2}{(d^2+1)^{\frac{3}{2}}}$, il est facile de voir qu'en la prenant pour unité, le carré de l'intensité t' pour une distance polaire q deviendra :

$$t'^2=\frac{(d^2+1)^3}{2}\left\{\frac{(d^2+1)^2+4d^2\cos^2 q-(d^2-1)\sqrt{(d^2+1)^2-4d^2\cos^2 q}}{[(d^2+1)^2-4d^2\cos^2 q]^2}\right\}.$$

ou seulement

$$t'=\sqrt{1+3\cos^2 q} \quad \text{ou} \quad t'=\sqrt{1+3\sin^2 m},$$

lorsque d est assez grand par rapport à 1 pour que l'on puisse se borner aux deux premiers termes du développement du radical qui entre dans l'expression générale de t'^2, après lui avoir donné la forme $d^2\left(1+2\frac{(1-2'\cos^2 q)}{d^2}\right)$.

Ainsi, dans cette hypothèse, l'intensité magnétique devient très-simple pour une distance polaire quelconque, ou pour une latitude magnétique quelconque $m=90°-q$, et l'on retrouve en effet $t'=2$, pour $q=0$, ou $m=90°$, conformément à ce que l'on admet en général, comme nous l'avons dit (p. 820, 821).

Cependant l'ensemble des observations d'intensité qui ont été faites jusqu'à présent, à diverses distances de l'équateur magnétique, ne suffisent pas pour établir avec certitude que l'intensité

Digitized by Google

vers les pôles est double de l'intensité de l'équateur magnétique. Ainsi, en admettant, comme on le fait en général, que les deux centres magnétiques sont très-près l'un de l'autre par rapport à la longueur du rayon terrestre, et qu'ils sont aussi très-voisins du centre de la terre, on fait une hypothèse qui peut très-notablement s'écarter de la vérité. Il est facile de voir, par exemple, que $d=4$ et $d=5$ donnent pour les rapports des intensités polaires et équatoriales, 2,5 et 2,29; et comme rien, dans les expériences qui ont été faites jusqu'à ce jour, n'empêche absolument d'admettre ces intensités, surtout la dernière, rien ne prouve, jusqu'à présent, que les centres magnétiques ne sont pas au quart ou au cinquième du rayon terrestre.

Ce doute prend plus de force encore lorsqu'on examine la loi d'accroissement des inclinaisons.

En effet, si nous nous reportons à la composition des forces qui nous a conduit à l'expression générale de la résultante, il est facile de voir que l'angle u que fait cette résultante avec l'axe des x, est donné par la relation :

$$\text{tang}\, u = \frac{r'^2 \sin a + r^2 \sin b}{r'^2 \cos a + r^2 \cos b} = \frac{y(r^3 + r'^3)}{x(r^3 - r'^3) + r'^3 + r^3}.$$

On a, d'ailleurs, $\text{tang}\, u = -\text{tang}\,(i+m)$, en appelant m la latitude magnétique, et i l'inclinaison, c'est-à-dire l'angle de la résultante ou de l'aiguille avec la perpendiculaire au rayon qui joint le centre de l'aiguille au point qui forme la demi-distance des centres magnétiques; et, puisque

$$r = \sqrt{d^2 + 1 - 2d \sin m}, \qquad r' = \sqrt{d^2 + 1 + 2d \sin m},$$

on peut facilement calculer la valeur exacte de tang i, lorsqu'on connaît la latitude magnétique.

Si l'on veut se borner à une première approximation dans les développements de r et r', il en résulte :

$$\text{tang}\, i = 2\, \text{tang}\, m \left(\frac{d^2 - \sin^2 m}{d^2 + 1 + 2 \sin^2 m} \right),$$

et pour d très-grand :

$$\text{tang}\, i = 2\, \text{tang}\, m,$$

qui est la formule dont nous avons parlé (page 817), et dont on

se sert habituellement pour déterminer les points de l'équateur magnétique terrestre par des observations d'inclinaisons comprises entre 0 et 30°. Mais les points déterminés par cette méthode pourraient être en erreur de plus de 2° pour des inclinaisons de 25 à 30°, si les centres magnétiques se trouvaient au quart ou au cinquième du rayon. Une autre cause encore pourrait contribuer à introduire des erreurs dans l'équateur magnétique que l'on a tracé : c'est la supposition que l'on a faite que le centre de la terre coïncide sensiblement avec le point qui forme la demi-distance des centres magnétiques.

Le tableau suivant contient les inclinaisons i calculées par la formule exacte pour les latitudes magnétiques prises de 5 en 5° dans la supposition $d = 4$, et les inclinaisons i' calculées en supposant que la tangente de l'inclinaison est double de la tangente de la latitude.

m	u pour $d = 4$.	i	i'
0° 30′	178° 35′ 6″	0° 54′ 54″	0° 59′ 59″
1	177 10 26	1 49 35	1 59 57
5	165 57	9 3 0	9 55 30
10	152 15	17 45	19 25 30
15	139 10	25 50	28 11 10
20	126 52	33 8	36 3 10
25	115 21	39 39	43 0 10
30	104 33	45 27	49 6 30
35	94 23	50 37	54 28 10
40	84 42	55 18	59 12 30
45	75 30	59 30	63 26 »
50	66 35	63 25	67 11 20
55	57 55	67 5	70 42 10
60	49 25	70 35	73 53 50
65	41 2	73 58	76 52 30
70	32 42	77 18	79 41 10
75	24 32	80 28	82 28 20
80	16 21	83 39	84 58 40
85	8 10	86 50	87 29 40
89	1 38 0	89 21	89 30 »
89 30	0 49 0	89 41	89 45 »

On voit, en effet, que, pour des latitudes magnétiques qui dépassent 5 ou 6°, les inclinaisons calculées dans l'hypothèse de d très-grand deviennent rapidement plus grandes que celles qui sont calculées dans l'hypothèse de $d = 4$, et ces dernières sont en général bien plus rapprochées des faits que l'on observe.

Digitized by Google

Si les phénomènes généraux du magnétisme terrestre pouvaient être représentés en admettant deux centres magnétiques qui fussent les mêmes pour tous les points de la surface de la terre, on parviendrait, sans aucun doute, à exprimer non-seulement les intensités et les inclinaisons, mais encore les déclinaisons, d'une manière exacte pour tous les points où il n'y aurait pas de cause perturbatrice locale. Une construction très-simple m'a conduit à la formule suivante pour représenter la déclinaison v' sur un parallèle à l'équateur terrestre correspondant à la latitude astronomique l' :

$$\operatorname{tang} v' = \frac{\cos a \sin z \cos l' - p \sin a \sin(z-b) \sin l'}{\sin a \sqrt{1 - p^2 \sin^2(z-b)}};$$

a, angle que l'axe magnétique fait avec le parallèle, ou complément de l'angle qu'il fait avec l'axe de la terre;

$p = \frac{e}{r}$, r étant le rayon du parallèle, e la distance qui existe entre le centre de ce parallèle et le point où l'axe magnétique vient traverser son plan;

b, angle que la ligne e fait avec la projection de l'axe magnétique sur le plan du parallèle;

z, angle formé par la projection de l'axe et par une droite qui joint un point quelconque de la circonférence du parallèle au point où l'axe traverse son plan; z est compté de 0 à 360°.

Si, au lieu d'un parallèle, on considère l'équateur terrestre lui-même, on a $l' = 0$, et la déclinaison v correspondant à un point quelconque de la circonférence équatoriale est donnée par la formule :

$$\operatorname{tang} v = \frac{\cos a \sin z}{\sin a \sqrt{1 - p^2 \sin^2(z-b)}}.$$

Ainsi la déclinaison est nulle pour $z = 0$ et 180°; et, lorsque p est petit, elle atteint son maximum pour des valeurs de z qui sont voisines de $z = 90°$ et 327°, quel que soit b.

Mais ce qu'il faut surtout remarquer, c'est que, de part et d'autre de la projection de l'axe magnétique sur l'équateur, les déclinaisons, qui sont nulles sur cette projection, doivent se reproduire exactement les mêmes, au signe près, pour les valeurs de z, qui diffèrent de 180°. Or, cette exacte symétrie des déclinaisons, non pas aux extrémités d'un même diamètre, mais aux

ERREY.

	0	130		140		150		160		170		180	
80	29 7	0-3	23-0	25-5	27-7	31-0	33-5	37-0	38-0	40-5	42-7	47-0	80
70	29 0	8-5	11-0	13-5	16-0	18-0	19-8	21-8	24-0	28-5	29-5	30-8	70
	26 8	3 0	1 0	1-3	3-8	9-3	11-8	15-4	17-0	19-5	21-3	23-4	
60	24 8	3 5	2 3	1 2	0-2	3-4	6-1	9-3	12-7	15-3	17-8	20-9	60
	24 3	3 3	2 3	1 8	0-3	1-9	4-3	7-4	9-8	12-3	15-2	23-3	
50	25 8	2 2	0 8	0-1	1-6	3-3	5-0	7-3	9-8	12-1	15-3	17-4	50
	23 3	0 8	0 0	0-5	1-8	3-5	5-3	7-3	9-7	12-2	13-9	16-1	
40	21 8	0-5	1-2	1-5	3-0	4-8	6-7	8-4	10-0	11-3	12-4	14-3	40
	20 6	1-2	1-9	2-6	3-5	5-1	6-6	8-2	9-8	11-3	12-5	14-3	
30	19 0	1-2	2-0	2-7	3-7	5-3	6-8	8-5	10-1	11-7	12-8	13-2	30
	19 1	1-6	2-4	3-3	4-5	5-5	6-8	8-2	9-8	10-7	11-5	12-5	
20	19 7	1-6	2-5	3-3	4-6	5-8	7-0	8-4	10-0	10-8	11-7	12-3	20
	19 3	1-8	2-7	3-4	4-5	5-7	7-1	8-3	9-8	11-0	12-0	12-5	
10	19 0	1-9	2-8	3-5	4-6	5-8	7-3	8-5	9-0	11-2	11-8	11-7	10
	19 3	1-5	2-2	3-0	4-4	5-3	7-2	9-2	9-8	10-1	10-5	11-1	
0	19 6	1-5	2-3	3 1	4-5	5-5	7-5	9-5	9-9	10-2	10-5	10-2	0
	19 3	1-5	2-3	3-2	4-0	4-7	6-4	8-4	8-5	9-8	9-8	10-2	
10	19 0	1-5	2-3	3-4	4-0	5-0	6-6	8-4	8-6	9-7	9-9	10-3	10
	19 5	2-0	7-0	4-3	5-3	6-1	7-3	8-6	9-5	10-3	10-7	10-4	
20	19 3	2-0	3-1	4-4	5-5	6-7	7-4	8-8	9-7	10-3	10-8	11-1	20
	18 8	0-8	2-8	4-9	6-8	8-2	9-1	9-7	10-2	10-0	9-5	9-8	
30	18 6	0-8	2-8	5-1	7-0	8-3	9-2	9-8	10-3	9-9	9-4	9-9	30
	19 2	0 3	2-5	4-7	7-2	9-0	11-1	11-1	11-8	10-8	10-5	11-5	
40	18 0	0 8	2-5	5-2	7-2	9-7	11-8	13-0	13-5	11-8	12-5	12-2	40
	17 0	0 3	2-5	5-0	7-3	10-6	12-8	13-4	13-7	13-5	13-2	13-3	
50	16 7	0 3	2-4	5-4	8-0	11-0	12-8	14-0	14-2	14-5	14-8	15-0	50
	15 3	0 8	1-7	5-3	9-3	14-0	15-1	16-5	16-7	15-2	15-8	15-8	
60	14 7	2 0	1-2	5-2	10-5	14-7	17-0	17-8	18-3	18-1	17-8	17-2	60
	15 3	4 5	1-3	5-8	12-0	16-5	18-5	19-5	19-5	20-5	19-2	19-3	
70	13 3	6 5	1-3	8-8	16-3	21-1	23-1	24-6	28-2	28-2	26-8	26-5	70
	12 7	12 5	0-8	14-5	23-7	31-7	35-3	37-0	39-0	39-0	39-5	38-8	
	11 0	46 0	pôle	46-0	56-0	67-0	66-5	65-0	62-0	61-0	57-0	58-0	
	0	130		140		150		160		170		180	

Nota. orientales, il est séparé par un *trait*.

	180		170	0		30		20		10		0	
80	47-0	51-3	57-8	7 0	64 5	62 0	51 0	46 5	41 8	39 3	35 0	29 7	80
70	30-8 23-4	33-3 26-8	37-0 28-8	0 0	55 0 52 5	51 5 47 6	49 0 45 0	45 5 41 7	42 0 37 8	37 0 33 8	35 0 30 3	29 0 26 8	70
60	20-9 23-3	22-2 21-7	21-5 23-8	8 9 2 6	46 8 42 8	44 6 40 0	41 5 39 0	38 7 36 3	35 5 32 5	32 4 30 2	28 0 28 0	24 8 24 3	60
50	17-4 16-1	19-8 18-8	21-3 19-2	6 5 4 3	35 8 30 8	35 7 30 1	33 8 30 0	31 9 28 1	30 5 27 8	28 8 25 6	27 2 24 4	25 8 23 3	50
40	14-3 14-3	15-2 15-0	17-0 17-0	3 5 9 8	23 9 21 5	25 1 22 2	25 0 22 8	25 5 24 0	24 5 24 0	24 8 23 9	23 3 21 5	21 8 20 6	40
30	13-2 12-5	13-8 13-2	14-4 14-0	7 3 4 0	17 7 16 0	19 2 18 3	22 2 19 5	22 8 21 8	22 5 22 3	21 8 20 5	20 8 20 0	19 0 19 1	30
20	12-3 12-5	12-7 12-0	12-2 11-5	10 2 6 7	12 8 10 8	16 5 14 6	18 1 17 8	20 0 19 0	20 6 19 6	21 0 19 8	19 9 19 8	19 7 19 3	20
10	11-7 11-1	11-3 9-2	10-6 8-1	5 4 4 8	9 7 8 5	13 7 11 6	16 5 15 0	18 2 16 8	19 4 18 0	19 5 18 8	19 5 19 3	19 0 19 3	10
0	10- 10-2	9-0 9-4	8-0 9-0	4 5 3 3	7 9 7 0	11 5 10 7	11 3 13 1	16 3 15 8	17 5 17 3	18 5 18 8	19 1 19 0	19 6 19 3	0
10	10-3 10-4	9-3 9-5	8-9 8-9	3 1 3 1	6 7 5 4	10 3 8 5	12 6 11 0	15 2 13 8	16 8 15 8	18 5 17 3	18 9 18 5	19 0 19 5	10
20	11-1 9-8	9-8 9-8	8-8 9-3	1 9 0-3	4 8 2 8	7 1 5 3	9 7 8 1	12 3 10 6	14 4 13 1	16 3 15 2	18 0 17 2	19 3 18 8	20
30	9-9 11-5	10-1 11-1	9-9 10-8	1-0 1-9	2 2 0 4	5 0 3 1	7 6 6 7	9 8 8 5	12 2 11 0	14 2 13 2	16 5 16 3	18 6 19 2	30
40	12-2 13-3	13-0 13-0	12-1 12-0	3-8 5-0	0-8 2-0	2 1 0 8	4 9 3 8	7 6 6 3	12 5 9 0	12 1 11 8	15 0 14 2	18 0 17 0	40
50	15-0 15 8	14-3 15-3	13-5 15-3	7-2 9-7	3-8 6-8	1-2 3-8	1 6 0-4	4 8 2 7	8 0 6 0	11 0 9 3	13 9 12 5	16 7 15 3	50
60	17-2 19-3	16-8 19-3	16-2 17-3	11-0 12-2	8-2 9-0	5-2 5-3	2-3 2-0	0 5 1 3	4 3 4 6	8 0 8 0	11 8 11 3	14 7 15 3	60
70	26-5 38-8	25-5 38-5	25-2 37-3	14-2 15-1	11-3 12-1	8-1 8-8	4-8 5-8	1-3 2-8	2 4 1 0	6 0 5 3	9 8 9 3	13 3 12 7	70
	58-0	56-0	54-5	14-6	12-3	10-3	7-5	4-0	0-0	3 2	7 0	11 0	
	180		170	40		30		20		10		0	

Nota. Partout le d est séparé par un *trait*.

Digitized by Google

extrémités d'une même ligne, passant par le point où l'axe magnétique traverse l'équateur, ne se reproduit en aucune façon ; au contraire, on voit, sur la circonférence de l'équateur, une dissymétrie frappante : au lieu de deux points où la déclinaison est nulle, on en trouve trois, plus ou moins séparés les uns des autres, et, au lieu d'avoir des *maximum* de déclinaison égaux et opposés, il arrive que l'un de ces *maximum* surpasse l'autre de plusieurs degrés. Il en résulte donc évidemment l'impossibilité absolue de reproduire les phénomènes magnétiques, en supposant que, pour tous les points de la terre, les centres d'action soient les mêmes. J'insiste sur cette conséquence, qui est très-importante, en faisant remarquer que ce défaut de symétrie dans les déclinaisons ne paraît pas pouvoir s'expliquer par des actions locales particulières, qui ne s'étendraient qu'à une petite distance de l'équateur, car les déclinaisons des divers parallèles, soit dans l'hémisphère boréal, soit dans l'hémisphère austral, s'écartent aussi beaucoup de la formule qui devrait les exprimer, et il ne paraît pas possible de donner à p une valeur convenable pour les représenter par cette formule avec une approximation suffisante.

Il résulte de ce qui précède :

1° Qu'il est très-important de multiplier les observations d'intensité vers les pôles magnétiques, afin de reconnaître le véritable rapport qui existe entre cette intensité et celle de l'équateur magnétique ;

2° Qu'il peut rester quelque doute sur l'étendue en latitude, dans laquelle il est permis d'admettre rigoureusement que la tangente de l'inclinaison est double de la tangente de la latitude magnétique, et par conséquent sur la véritable position de plusieurs points de l'équateur magnétique qui ont été déterminés par cette formule, en y appliquant des observations d'inclinaison faites à des latitudes de 15,25 ou 30° ;

3° Qu'en admettant l'hypothèse de deux pôles magnétiques égaux et contraires, placés, d'ailleurs, d'une manière quelconque dans le sein de la terre, il n'y a aucune possibilité de représenter avec une approximation suffisante l'ensemble des déclinaisons qu'on a observées, ni même les déclinaisons qui appartiennent à l'équateur terrestre ou à un parallèle quelconque, et que cette impossibilité ne résulte pas des incertitudes qui peuvent exister sur le véritable tracé de l'équateur magnétique.

§ 6. *Aurores boréales.*

314. Le phénomène des aurores boréales paraît être le plus magnifique, le plus imposant, le plus resplendissant de ceux qui puissent s'offrir à nos regards, et en même temps le plus compliqué, le plus inextricable, le plus insaisissable de tous ceux qui s'offrent à nos recherches. Avant que les premières notions de la science fussent écloses, on admirait les aurores boréales comme on admirait le lever et le coucher du soleil, le spectacle du ciel et le mouvement des astres. Depuis qu'il est permis de les regarder avec des yeux moins étonnés, on les admire, on les observe, on les mesure, et l'on n'a rien appris encore sur leur origine, sur leurs causes, sur leurs lois, sur les conditions physiques et matérielles de leurs apparitions, ni même sur le lieu qu'elles occupent, car reste des doutes sur la question de savoir si elles sont renfermées dans le sein de l'atmosphère, ou si elles se manifestent au delà de ses limites. Ce serait le désespoir de la science, si la science pouvait se désespérer; mais tous les jours elle apprend à mieux reconnaître qu'il y a entre les phénomènes naturels des liens de subordination nécessaire; que tenter des explications prématurées, c'est fausser la méthode; qu'il faut savoir ignorer, ou plutôt savoir attendre, c'est-à-dire chercher des phénomènes plutôt que des explications. Peut-être un simple fait, jusqu'à ce jour inaperçu, suffira-t-il pour lever le voile qui nous cache depuis si longtemps tous les mystères de l'aurore boréale.

Il suffit d'indiquer combien le phénomène est grand, et combien est grande notre ignorance, pour faire comprendre qu'il faudrait des volumes entiers si l'on voulait rendre compte de toutes les idées, de tous les systèmes, de tous les efforts d'esprit ou d'imagination dont il a été l'objet. Nous ne pouvons pas entreprendre ici une telle tâche, et nous nous bornerons à rapporter la description d'une aurore boréale, telle qu'elle a été faite sur les lieux par M. Lottin, lieutenant de vaisseau, l'un des laborieux et zélés observateurs de l'expédition d'Islande.

L'observatoire météorologique où M. Lottin a passé 8 mois (de septembre 1838 à avril 1839), était établi à Bossekop, sur la côte de West-Finmark, par 70° de latitude boréale; pendant ces 206 jours on a observé 143 aurores boréales, parmi les-

Digitized by Google

quelles il s'en est trouvé 64 pendant la nuit de 70 *jours* qui règne dans ces parages, depuis le 17 novembre jusqu'au 25 janvier.

Voici maintenant comment M. Lottin décrit le phénomène (la figure 12 (Pl. 49), copiée sur ses dessins, pourra faciliter l'intelligence de la description) :

« Le soir, entre 4 et 8 heures, la brume légère qui règne presque habituellement au nord dans la direction du Fiord, à la hauteur de 4 à 6°, se colore à sa partie supérieure, ou plutôt se frange des lueurs de l'aurore, qui existe derrière. Cette bordure devient plus régulière et forme un arc vague, d'une couleur jaune pâle, dont les bords sont diffus et dont les extrémités s'appuient sur les terres.

« Cet arc monte plus ou moins lentement, son sommet restant dans le méridien magnétique ou à très-peu près ; ce qu'il n'est pas facile de déterminer avec exactitude, à cause de son mouvement ascensionnel et de sa forme déprimée.

« Bientôt des stries noirâtres séparent régulièrement la matière lumineuse de l'arc ; les rayons sont formés ; ils s'allongent, se raccourcissent lentement ou instantanément ; *ils dardent*, augmentant et diminuant subitement d'éclat. La partie inférieure, les *pieds* des rayons, offrent toujours la lumière la plus vive, et forment un arc plus ou moins régulier : la longueur de ces rayons est souvent très-variée, mais tous convergent vers un même point du ciel, indiqué par la direction de la pointe sud de l'aiguille d'inclinaison ; parfois ils se prolongent jusqu'à leur point de réunion, formant ainsi le fragment d'une immense coupole lumineuse.

« L'arc continue de monter vers le zénith ; il éprouve un mouvement ondulatoire dans sa lueur, c'est-à-dire que, d'un pied à l'autre, l'éclat de chaque rayon augmente successivement d'intensité ; cette espèce de courant lumineux se montre plusieurs fois de suite, et bien plus fréquemment de l'ouest à l'est que dans le sens opposé. Quelquefois, mais rarement, un mouvement rétrograde a lieu immédiatement après le premier, et aussitôt que cette lueur a parcouru successivement tous les rayons de l'ouest à l'est, elle se dirige dans le sens inverse, revenant ainsi à son point de départ, sans que l'on puisse dire si ce sont les rayons qui éprouvent alors un mouvement de translation à peu près horizontal, ou si cette lueur plus vive se transporte

Digitized by Google

d'un rayon à l'autre de proche en proche, sans que ceux-ci éprouvent de déplacement.

« L'arc offre aussi un mouvement alternatif dans le sens horizontal, figurant les ondulations ou les plis d'un ruban ou d'un drapeau agité par le vent, comme on le voit dans la figure 12. Parfois un de ses pieds, et même tous deux, abandonnent l'horizon; alors les plis deviennent plus nombreux, mieux prononcés; l'arc n'est plus qu'une longue bande de rayons qui se contourne, se sépare en plusieurs parties, formant des courbes gracieuses, qui se referment presque sur elles-mêmes, et offrent, n'importe dans quelle partie de la voûte céleste, ce que l'on a probablement nommé jusqu'ici des couronnes boréales. Alors l'éclat des rayons varie subitement d'intensité, dépasse celui des étoiles de première grandeur; ces rayons dardent avec rapidité, les courbes se forment et se déroulent comme les plis et replis d'un serpent; puis les rayons se colorent; la base est rouge, le milieu vert, le reste conserve sa teinte lumineuse jaune clair. Ces couleurs ont toujours, sans exception, conservé ces positions respectives; elles sont d'une admirable transparence : le rouge approche de la teinte sang clair, le vert de celle d'une émeraude pâle. L'éclat diminue, les couleurs disparaissent, tout s'éteint subitement ou s'affaiblit peu à peu. Des fragments d'arc reparaissent : l'arc se reforme lui-même, continue son mouvement ascensionnel et approche du zénith : les rayons, par l'effet de la perspective, deviennent de plus en plus courts; on peut juger de l'épaisseur de l'arc, qui offre parfois, alors, une large zone de rayons parallèles; puis le sommet de l'arc atteint le zénith magnétique, point désigné par la pointe sud de l'aiguille d'inclinaison. Alors les rayons sont vus par leurs pieds : s'ils se colorent en ce moment, ils montrent une large bande rouge à travers laquelle on distingue les nuances vertes qui leur sont supérieures; et, s'ils subissent ce mouvement de translation horizontale dont nous avons parlé plus haut, les pieds forment une longue zone sinueuse et ondulante, tandis que, dans tous ces changements continuels, les rayons n'éprouvent jamais d'oscillation dans le sens de leur axe, et conservent toujours leur parallélisme.

« Pendant l'intervalle de temps qui vient d'être décrit, de nouveaux arcs se sont présentés à l'horizon, commençant d'une manière diffuse, ou avec les rayons tout formés et très-vifs. Ils se succèdent en passant à peu près par les mêmes phases, et se

Digitized by Google

maintiennent à distance les uns des autres ; on en a compté ainsi jusqu'à neuf, appuyés sur les terres, et rappelant, par leur disposition, ces toiles cintrées qui vont d'une coulisse à l'autre et figurent le ciel de nos scènes théâtrales. Parfois les intervalles diminuent; plusieurs de ces arcs se serrent l'un contre l'autre : c'est une large zone de rayons parallèles qui traversent le ciel et vont disparaître vers le sud, s'affaiblissant rapidement après leur passage au zénith. Mais parfois aussi, lorsque cette zone occupe le haut du ciel, s'étendant de l'est à l'ouest, la masse des rayons qui ont déjà dépassé le zénith magnétique paraît tout à coup venir du sud, et forme avec ceux du nord la véritable couronne boréale, dont tous les rayons convergent vers le zénith. Ainsi, cette apparence de couronne ne vient, sans doute, que d'un simple effet de perspective, et l'observateur placé dans cet instant à une certaine distance au nord ou au sud, n'apercevrait qu'un arc.

« La zone totale du rayon étant moins épaisse dans le sens nord et sud que dans le sens est et ouest, puisqu'elle s'appuie souvent sur les terres, la couronne a une forme elliptique. Mais cela n'a pas toujours lieu : on l'a vue circulaire, les rayons inégaux ne s'étendant pas à plus de 8° à 12° du zénith, tandis que d'autres fois ils vont jusqu'à l'horizon.

« Si l'on pense qu'alors tous ces rayons dardent avec vivacité, variant continuellement et subitement dans leur longueur et dans leur éclat, que de belles teintes rouges et vertes les colorent par intervalles, que les mouvements ondulatoires ont lieu, que les courants lumineux se succèdent, et enfin que la voûte céleste tout entière offre une immense et magnifique coupole étincelante, dominant un sol couvert de neige qui, lui-même, sert de cadre éblouissant à une mer calme et noire comme un lac d'asphalte, on n'aura encore qu'une idée très-imparfaite de l'admirable spectacle qui s'offre à l'observateur et qu'il faut renoncer à décrire.

« La couronne ne dure que quelques minutes; elle se forme quelquefois instantanément, sans aucun arc préalable. Il y en a rarement plus de deux dans la même nuit, et bien des aurores n'en ont montré aucune trace.

« La couronne s'affaiblit, tout le phénomène est au sud du zénith, formant des arcs plus pâles et qui disparaissent généralement avant d'avoir atteint l'horizon sud. Le plus ordinaire-

Digitized by Google

ment, tout ceci a lieu dans la première moitié de la nuit, après quoi l'aurore paraît avoir perdu de son intensité; des faisceaux de rayons, des bandes, des fragments d'arcs paraissent et disparaissent par intervalles; puis les rayons deviennent de plus en plus diffus, ce sont des lueurs vagues et faibles qui finissent par occuper tout le ciel groupées comme de petits cumulus, et désignées sous le nom de *plaques aurorales*. Leur lumière lactée éprouve souvent des changements très-vifs dans son intensité, semblables à des mouvements de dilatation et de contraction, qui se propagent du centre à la circonférence, et réciproquement, rappelant ceux de ces animaux marins nommés *méduses*. La lueur crépusculaire arrive peu à peu, et le phénomène faiblissant graduellement cesse d'être visible.

« D'autres fois, les rayons paraissent encore avec le commencement du jour, même lorsqu'on peut lire sans difficulté le texte d'un imprimé; puis ils disparaissent tout à coup : ou bien, à mesure que le crépuscule augmente, ils deviennent vagues, prennent une couleur blanchâtre, et finissent par se confondre avec les cirrho-stratus, de telle sorte qu'il devient impossible de les distinguer de cette espèce de nuage. »

Telle est l'apparence de l'aurore boréale quand elle se montre dans sa plus grande magnificence : mais, soit que l'état du ciel ou les circonstances atmosphériques ne soient pas toujours favorables, soit que les conditions elles-mêmes qui déterminent le phénomène ne soient pas toujours satisfaites en même temps, il arrive très-rarement que l'on puisse observer une aurore boréale complète, même dans les régions septentrionales. Tantôt la couronne ne se forme que d'une manière vague et incertaine; tantôt l'arc est incomplet ou multiple dans quelques points; tantôt enfin l'on aperçoit des nuages qui interceptent la lumière, qui se colorent sur leurs bords ou dans leur épaisseur, et qui altèrent, par mille accidents plus ou moins remarquables, la forme régulière de l'aurore boréale. Alors on distingue encore vers le nord une lumière extraordinaire, mais le phénomène est confus et mal défini. On conçoit qu'il puisse offrir mille apparences plus ou moins étonnantes.

Nous n'avons parlé que de l'aurore boréale de l'hémisphère boréal; mais l'on a observé un phénomène tout à fait semblable dans l'hémisphère austral, et il n'y a aucun doute que vers le pôle sud de la terre il ne se produise aussi des aurores bo-

Digitized by Google

réales, ou, si l'on veut, des *aurores australes*. Cependant les aurores du pôle austral ont été seulement aperçues par les navigateurs; elles n'ont pas été observées, mesurées et décrites comme les aurores boréales, et c'est par induction que l'on admet qu'elles doivent avoir les mêmes rapports avec le magnétisme terrestre.

FIN.

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES.

DU DEUXIÈME VOLUME.

LIVRE QUATRIÈME.

DES ACTIONS MOLÉCULAIRES.

Numéros. Pages

1. Considérations générales 1

CHAPITRE I.

Capillarité.

2. Définitions 2
3. Les longueurs des colonnes soulevées ou déprimées sont en raison inverse des diamètres des tubes 2
4. Mesure des ménisques 5
5. Hauteurs différentes auxquelles peut s'arrêter le même liquide dans le même tube 8
6. Procédé indirect pour mesurer les hauteurs des colonnes capillaires. 9
7. Lames parallèles, lames inclinées, tubes coniques, tubes prismatiques, surfaces de différentes formes 10
8. Attractions et répulsions qui résultent de la capillarité 12
9. Adhésion des liquides contre les surfaces solides 12
10. Divers effets de la capillarité 14
11. De l'endosmose 15
12. Indications théoriques 18

CHAPITRE II.

Structure des corps.

13. Considérations générales 20
14. Mobilité des fluides et forces constitutives 20
15. Des changements de structure que peuvent prendre les corps solides sans perdre leur solidité 22
16. Des propriétés que prennent les corps en se consolidant après une fusion complète ou incomplète 26
17. Des propriétés que prennent les corps en se précipitant des dissolutions qui les contiennent 30

CHAPITRE III.

De l'Élasticité.

Numéros. Pages.

18. Diverses espèces d'élasticité.................................... 32
19. De la compressibilité des liquides et de la chaleur qui en résulte..... 32
20. De l'élasticité de tension et de la ténacité........................ 37
21. De l'élasticité de torsion.. 45
22. Formule de l'élasticité de torsion................................. 47

LIVRE CINQUIÈME.

ACOUSTIQUE.

23. Considérations générales.. 49

CHAPITRE I.

De la production du son et de sa transmission dans l'air atmosphérique.

24. Le son est un mouvement particulier excité dans la matière pondérable.. 51
25. Le mouvement qui produit le son est toujours un mouvement de vibration.. 53
26. Chaque vibration du corps sonore excite dans l'air une ondulation d'une longueur déterminée.. 54
27. De la gravité et de l'acuité des sons................................ 58
28. Intensité.. 58
29. Timbre.. 59
30. Tous les sons, quels que soient leur ton, leur timbre ou leur intensité, se propagent dans l'air avec la même vitesse................ 59
31. La vitesse du son dans l'air est de 340 mètres par seconde à 16°.... 59

CHAPITRE II.

Évaluation numérique des sons.

32. Lois générales des vibrations des cordes et des sons harmoniques qu'elles produisent.. 61
33. Lois générales des vibrations des tuyaux cylindriques et du battement qui résulte de deux sons voisins................................ 66
34. Lois des vibrations des lames ou des tiges........................... 70
35. Loi des vibrations de la sirène..................................... 71
36. Détermination d'un son fixe ou du nombre absolu de vibrations qui correspondent à un son donné.. 73
37. De la longueur absolue des ondes sonores............................ 75
38. De la limite des sons perceptibles.................................. 76

Digitized by Google

CHAPITRE III.

Vibrations des corps solides.

Numéros. Pages.

39. Vibrations des corps dont deux dimensions sont petites par rapport à la troisième : tubes, verges cylindriques et prismatiques, etc.... 78
40. Vibrations des corps dont une seule dimension est petite par rapport aux deux autres : plaques, membranes, cloches, etc............ 83
41. Effets de l'air sur la forme des lignes nodales.................... 96
42. Vibrations des corps qui n'ont pas la même élasticité dans tous les sens.. 96
43. Vibrations des corps dont aucune dimension n'est petite par rapport aux autres.. 98
44. Des vibrations des corps dans différents milieux................ 99

CHAPITRE IV.

Du mouvement de vibration des masses fluides et de la vitesse du son dans les différents milieux.

45. Divers moyens d'exciter les vibrations sonores dans les gaz......... 101
46. Les parois qui enveloppent une masse d'air ont une influence sur ses vibrations.. 103
47. Changements que peut recevoir le son d'un tuyau, soit par les obstacles qu'on oppose à l'air, soit par les modifications de l'embouchure.. 104
48. Vitesse du son dans les fluides élastiques, formules théoriques...... 106
49. Vitesse du son dans les fluides élastiques, déterminée par la vibration des tuyaux.. 107
50. De la réflexion du son et des échos.............................. 109
51. Des surfaces nodales que l'on observe dans les grandes masses d'air qui sont en vibration..................................... 112
52. Divers moyens de faire vibrer les liquides....................... 112
53. Vitesse du son dans les liquides................................. 114
54. Vitesse du son dans les solides.................................. 117

CHAPITRE V.

Des vibrations de quelques instruments de musique.

55. Communication des vibrations sonores entre les solides et les fluides. 120
56. Communication des vibrations dans les corps solides contigus...... 121
57. Des instruments à anches... 122
58. Des instruments à cordes.. 124

CHAPITRE VI.

De la voix et de l'ouïe.

59. De la voix humaine.. 126
60. De la voix des oiseaux.. 129
61. De l'organe de l'ouïe.. 130

Digitized by Google

LIVRE SIXIÈME.

OPTIQUE.

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LA PROPAGATION DE LA LUMIÈRE.

Numéros. Pages.

62. Propagation de la lumière en général.......... 132
63. Dans un milieu homogène, la lumière se propage toujours en ligne droite.......... 132
64. Dans un milieu hétérogène, la lumière se meut toujours en ligne courbe.......... 133
65. Rayon, pinceau, faisceau de lumière.......... 133
66. L'intensité de la lumière d'un point lumineux décroît comme le carré de la distance augmente.......... 134
67. Corps opaques, diaphanes et translucides.......... 135
68. De l'ombre et de la pénombre.......... 136
69. Idée générale du phénomène de la vision.......... 139
70. La lumière se propage avec une si grande vitesse qu'elle vient du soleil à la terre en 8′ 13″.......... 140
Tableau des éléments de notre système planétaire.......... 141
71. Division de l'optique en lumière non polarisée et en lumière polarisée.......... 143

—

PREMIÈRE PARTIE.

LUMIÈRE NON POLARISÉE.

—

CHAPITRE I.

Catoptrique ou réflexion de la lumière.

72. De la réflexion de la lumière sur une surface plane.......... 144
73. Goniomètre de Charles.......... 147
74. Réflexions sur deux plans parallèles.......... 148
75. Réflexion sur deux miroirs inclinés.......... 149
76. Réflexion sur les miroirs courbes en général.......... 150
77. Réflexion sur les miroirs sphériques.......... 150
78. Miroirs coniques et cylindriques.......... 153
79. Des caustiques.......... 153
80. Héliostat de Gambey.......... 155

CHAPITRE II.

Dioptrique ou réfraction de la lumière.

81. Lois générales de la réfraction de la lumière.......... 158
82. Définitions et phénomènes généraux que présentent les rayons qui traversent des prismes.......... 162

Digitized by Google

Numéros. Pages.

83. Direction des rayons dans les prismes, et conditions de leur émergence.... 163
84. De la déviation produite par les prismes, et particulièrement de la déviation minimum.... 165
85. Recherches des indices de réfraction des solides et des liquides transparents.... 167
86. Du changement de valeur de l'indice de réfraction d'une substance quand le milieu qui l'environne change de nature, et de la vitesse de la lumière dans les différents milieux.... 168
87. Recherches du rapport de réfraction des corps opaques.... 170
88. De la puissance réfractive et du pouvoir réfringent.... 171
89. Recherches de l'indice de réfraction des gaz, de leur puissance réfractive et du pouvoir réfringent.... 172
90. Propriétés générales des lentilles.... 177
91. Lentilles de Fresnel ou lentilles à échelons. Phares.... 184

CHAPITRE III.

Décomposition et recomposition de la lumière.

92. La lumière blanche du soleil est composée de rayons diversement colorés.... 188
93. Les rayons diversement colorés sont diversement réfrangibles.... 190
94. Chaque couleur du spectre est une couleur simple.... 192
95. On recompose la lumière blanche en ramenant toutes les couleurs simples dans la même direction, ou en les faisant toutes concourir au même point.... 193
96. Des couleurs complémentaires et des nuances produites par le mélange de diverses couleurs simples en diverses proportions, d'après la règle de Newton.... 195
97. Toute lumière composée éprouve, en se réfractant, une décomposition et une recomposition.... 197
98. Les couleurs naturelles des corps sont en général des couleurs composées.... 200

CHAPITRE IV.

Des raies du spectre, de la dispersion et de l'achromatisme.

99. Des raies du spectre.... 203
100. Des indices de réfraction pour divers rayons du spectre.... 206
101. De la dispersion, des rapports de dispersion dans plusieurs substances, et des pouvoirs dispersifs.... 208
102. De l'achromatisme.... 210

CHAPITRE V.

De la vision et des instruments d'optique.

103. Structure de l'œil.... 217
104. Hypothèses par lesquelles on a essayé d'expliquer comment l'œil s'accommode aux distances.... 220

d by Google

Numéros. Pages.

105. Jugement sur la couleur, la forme, la situation et la grandeur des objets 221
106. Vision avec les deux yeux ou vision binoculaire. — Stéréoscope. — Pseudoscope 224
107. De la persistance des images et des couleurs accidentelles, Phénakisticope 228
108. De quelques accidents de la vue 229
109. Besicles 231
110. Loupes ou microscopes simples 232
111. Chambre claire 233
112. Chambre noire 234
113. Chambre noire photographique 235
114. Microscope solaire 237
115. Mégascope 239
116. Microscope photo-électrique 240
117. Microscope composé, principes de sa construction 244
118. Détails du microscope composé 245
119. Détermination des indices de réfraction des liquides et des corps mous translucides, au moyen du microscope 248
120. Télescopes 250
121. Lunette de Galilée, ou lunette de spectacle 252
122. Lunettes astronomiques 253
123. Oculaires astronomiques 254
124. Réticules et micromètres 259
125. Lunettes terrestres 261
126. Mesure du grossissement 262

CHAPITRE VI.

Observations microscopiques.

127. Considérations générales 263
128. Expériences préparatoires et illusions 264
129. Test-objets 266
130. Cristallisations 267
131. Tissus végétaux 268
132. Épiphytes 270
133. Infusoires 271
134. Parasites 273
35. Liquides et tissus organiques 274
136. Explication de la planche 37 278

CHAPITRE VII.

Phénomènes optiques de physique céleste.

137. L'invention des lunettes fut une ère nouvelle pour l'astronomie ... 280
138. Taches du soleil 281
139. Lumière zodiacale 286
140. Phénomènes observés pendant les éclipses totales de soleil 287
141. Apparence du globe de la lune 289

Digitized by Google

Numéros. Pages.
142. Lumière cendrée.......................... 293
143. Apparence des planètes.......................... 293
144. Apparence des comètes.......................... 298
145. Des étoiles et de leur distance à la terre.......................... 302
146. Étoiles doubles.......................... 307
147. Nébuleuses.......................... 308

CHAPITRE VIII.

Des interférences et de la diffraction.

148. Hypothèses sur le mode d'existence de la lumière.......................... 311
149. Expérience de Fresnel sur les franges produites par la rencontre des rayons réfléchis.......................... 314
150. Principe des interférences.......................... 315
151. Explication du principe des interférences dans le système des ondulations.......................... 319
152. Description de l'appareil général de diffraction.......................... 322
153. Franges produites par les bords des écrans.......................... 326
154. Franges intérieures produites dans l'ombre des corps déliés ou des écrans étroits.......................... 332
155. Franges produites par les petites ouvertures.......................... 335
156. Franges extérieures.......................... 335
157. Franges intérieures.......................... 338
158. Franges intérieures et extérieures.......................... 339
159. Franges produites par deux ouvertures très-voisines.......................... 341
160. Franges produites par réflexion sur les surfaces polies.......................... 341
161. Franges et spectres produits par les réseaux.......................... 341
162. Réseaux à mailles carrées.......................... 347
163. Réseaux à mailles rondes.......................... 348
164. Apparences au foyer des lunettes.......................... 348

Explication des anneaux colorés produits par les lames minces et par les plaques épaisses.

165. Formation des anneaux colorés dans les lames minces.......................... 350
166. Lois expérimentales des anneaux colorés, établies par Newton.......................... 351
167. Mesures expérimentales de Newton.......................... 353
168. Des accès de facile réflexion et de facile transmission.......................... 355
169. Théorie des phénomènes des lames minces dans le système des ondulations.......................... 357
170. Couleurs produites par les plaques épaisses.......................... 362
171. Couleurs produites par des miroirs sphériques et des écrans.......................... 365
172. Longueurs des ondulations déduites des phénomènes des plaques épaisses. Couleurs produites par des plaques de verre légèrement inclinées, ou par des corps d'égale épaisseur.......................... 368
173. Ériomètre du docteur Young.......................... 369

CHAPITRE IX.

De la vitesse de la lumière.

174. Historique.......................... 371

Digitized by Google

Numéros. Pages.
175. Expériences de M. Foucault.... 374
176. Expériences de M. Fizeau.... 382
176 *bis*. Expériences de MM. Fizeau et Breguet.... 383
177. Expériences de M. Fizeau sur la vitesse de propagation dans le sens du mouvement de l'eau ou en sens contraire.... 388

SECONDE PARTIE.

LUMIÈRE POLARISÉE.

CHAPITRE I.

Double réfraction.

178. Phénomène général de la double réfraction.... 396
179. Des cristaux à un axe et de leur section principale.... 396
180. Cristaux à deux axes.... 399
181. Lois générales de la double réfraction dans les cristaux à un axe et à deux axes.... 402
182. Diverses expériences de double réfraction.... 405
183. Double réfraction du verre comprimé.... 409
184. Micromètre à double image.... 410

CHAPITRE II.

Phénomènes généraux et lois générales de la polarisation.

185. Polarisation par réflexion.... 414
186. Polarisation par simple réfraction.... 417
187. Polarisation par double réfraction.... 417
188. Polarisation par réfraction irrégulière.... 418
189. Polarisation de la lumière atmosphérique.... 418
190. Loi de M. Brewster sur l'angle de polarisation.... 419
191. Loi de Malus sur le partage de la lumière polarisée.... 420
192. Loi de Fresnel sur l'intensité de la lumière réfléchie.... 423
193. Mouvement du plan de polarisation par l'effet de la réflexion.... 424
194. Polarisation partielle et polarisation complète produite par plusieurs réfractions successives.... 427
195. Mouvement du plan de polarisation par l'effet de la réfraction.... 428
196. De la polarisation produite par des réfractions successives.... 429
197. De l'action mutuelle des rayons polarisés.... 430

CHAPITRE III.

Couleur de la lumière polarisée.

198. Teintes colorées des lames parallèles à l'axe.... 439
199. Théorie de Fresnel sur les couleurs des lames cristallisées.... 441
200. Anneaux colorés dans les cristaux à un axe.... 448

Digitized by Google

Numéros. Pages.

201. Anneaux colorés dans les cristaux à deux axes................ 451
202. Franges hyperboliques ou parallèles produites par les cristaux.... 453
203. Cristaux superposés, cristaux colorés, verre trempé, etc........ 455
204. Houppes colorées de la lumière polarisée...................... 456
205. Microscope polarisant d'Amici................................ 457
206. Expériences de M. de Sénarmont sur la polarisation chromatique des substances biréfringentes et isomorphes.................. 459

CHAPITRE IV.

Polarisation rotatoire atomique et magnétique.

207. Motifs de rapprocher ces deux ordres de phénomènes.......... 463

§ 1. *Polarisation rotatoire atomique.*

208. Phénomènes de coloration des plaques de quartz perpendiculaires à l'axe du cristal, découverts par M. Arago................ 463
209. Lois expérimentales établies par M. Biot.— Découverte des quartz inverses et des pouvoirs rotatoires des liquides et des gaz...... 464
210. Théorie de Fresnel... 470
211. Appareil de M. Biot pour observer les phénomènes de polarisation rotatoire dans tous les corps............................ 474
212. Comparaison des pouvoirs rotatoires......................... 478
213. Expériences de M. Pasteur sur la corrélation qui existe entre la forme cristalline et les propriétés optiques................. 481
214. Appareil à compensateur de M. Soleil........................ 484
215. Polarisation rotatoire des rayons obliques.................. 487
216. Expériences de M. Jamin sur la polarisation elliptique que prennent les rayons polarisés en se réfléchissant à la surface des milieux transparents..................................... 488

§ 2. *Polarisation rotatoire magnétique.*

217. Observations générales...................................... 492
218. Comparaison des intensités.................................. 496

CHAPITRE V.

Notions théoriques.

Proposition I.. 502
Proposition II... 504
Proposition III.. 509
Proposition IV... 511
Proposition V.. 514
Proposition VI... 515
Proposition VII.. 516
Proposition VIII... 519
Proposition IX... 522
Proposition X.. 524
Proposition XI... 528
Proposition XII.. 531

LIVRE SEPTIÈME.

DE LA CHALEUR.

SECONDE PARTIE.

PROPAGATION DE LA CHALEUR ET CALORIMÉTRIE.

CHAPITRE I.

Propagation de la chaleur.

§ 1. *Phénomènes généraux de la chaleur rayonnante dans l'air et dans le vide.*

219. De l'existence de la chaleur rayonnante, et de l'idée qu'on peut se former des rayons calorifiques 537
220. Pouvoir émissif 538
221. Pouvoir absorbant 542
222. Pouvoir réfléchissant 543
223. Principe de l'équilibre mobile de température 543
224. Principe de la raison inverse du carré de la distance 544
225. Principe de l'égalité de température dans tous les points d'une enceinte vide dont les parois sont maintenues à une température constante 545
226. Loi du cosinus 546
227. Loi de la réflexion 547
228. Vitesse de la chaleur 547
229. Comparaison des pouvoirs émissifs, absorbants et réfléchissants des diverses substances. — Tableau des résultats 547
230. Équilibre de température dans une enceinte quelconque. — Réflexion du froid 550

§ 2. *Phénomènes généraux de la chaleur rayonnante dans les substances diathermanes.*

231. Des substances athermanes et diathermanes 552
232. Tous les corps diaphanes ne sont pas également diathermanes, et tous les corps opaques ne sont pas également athermanes 552
233. La quantité de chaleur réfléchie perpendiculairement sur les deux faces d'une plaque diathermane est à peu près constante et égale à un treizième de la chaleur incidente 553
234. Influence de l'épaisseur des plaques diathermanes, et composition des flux de chaleur émis par différentes sources ou transmis par différentes plaques 554
234 *bis*. Les rayons calorifiques les moins réfrangibles paraissent être les moins transmissibles 556
235. Diathermansie ou thermanisme 557
236. Pouvoir diffusif 558

Digitized by Google

Numéros. Pages.

§ 3. Lois du refroidissement, quantités de chaleur émises, et conditions générales de l'équilibre de température.

237. Lois du refroidissement dans le vide........................ 562
238. Loi du refroidissement dans les gaz........................ 570
239. Équilibre d'un thermomètre dans une enceinte vide dont toutes les parties ne sont pas à la même température................ 571
240. Expression de la quantité totale de chaleur émise par les corps... 572
241. Équilibre de température des corps protégés par une enveloppe diathermane.. 573

§ 4. Conductibilité des corps pour la chaleur.

242. Distinction de la conductibilité en pénétrabilité et perméabilité... 575
243. Conductibilité des solides. — Tableau des résultats........... 575
244. Expériences de M. de Senarmont sur la conductibilité de la chaleur dans les cristaux.................................. 580
245. Conductibilité des fluides.................................. 582

§ 5. Analogie des rayons calorifiques et des rayons lumineux.

246. Réfraction de la chaleur.................................. 584
247. Polarisation de la chaleur par double réfraction et rapport d'intensité.. 585
248. Variation du pouvoir réflecteur avec la nature du flux incident.. 588
249. Polarisation de la chaleur par réflexion, par réfraction simple, rapports d'intensité.................................. 589
250. Polarisation par émission.................................. 589
251. La chaleur éprouve comme la lumière les deux polarisations rotatoire, atomique et magnétique.......................... 592
252. Influence de la diffusion sur la polarisation des rayons incidents. 592
253. Conclusions.. 592

CHAPITRE II.

Calorimétrie.

§ 1. Capacité des corps pour la chaleur.

254. Des quantités de chaleur et des moyens de les comparer......... 595
255. Calorimètre de Lavoisier et de Laplace...................... 596
256. Méthode des mélanges...................................... 598
257. Méthode du refroidissement................................ 602
258. Capacité des gaz pour la chaleur. — Méthode de MM. Delaroche et Bérard.. 604
259. Méthode de Dulong et de MM. de La Rive et Marcet........... 607
260. Rapport des capacités des gaz à pression constante et à volume constant. — Définitions et méthode de Dulong............. 611
261. Méthode de MM. Clément et Désormes....................... 616
262. Capacité des gaz sous diverses pressions, formule de Poisson..... 617
263. Tableaux des chaleurs spécifiques.......................... 618
264. Remarques sur les neuf tableaux précédents.................. 627

Numéros. Pages.

§ 2. *Chaleur latente, chaleur des combinaisons, et mélanges réfrigérants.*

265. Chaleur latente de fusion. — Chaleur latente de la glace........ 630
266. Formules de M. Person pour exprimer les chaleurs latentes des corps solides.. 632
267. Calorique d'élasticité.. 637
268. Quantités de chaleur contenues dans les vapeurs d'après les observations de M. Pouillet.. 638
269. Chaleur latente de la vapeur d'eau d'après les observations de M. Regnault.. 642
270. Chaleurs latentes de diverses vapeurs au point d'ébullition des liquides.. 645
271. Chaleur des combinaisons. — Résultats de Lavoisier et de Laplace, Rumford, Desprez.. 646
272. Résultats de Dulong.. 648
273. Résultats de MM. Favre et Silbermann.. 654
274. Chaleur des combinaisons par voie humide. — Résultats de MM. Graham et Andrews.. 658
275. Chaleur animale. — Température de divers animaux........... 664
276. Quantités de chaleur produites par divers animaux............ 668
277. Mélanges réfrigérants. — Tableau des résultats................ 670

LIVRE HUITIÈME.

MÉTÉOROLOGIE.

—

CHAPITRE I.

De la chaleur terrestre.

278. Définitions générales.. 674
— Température de l'air à la surface du sol.................. 675
— Température moyenne des jours, des mois et des saisons..... 675
— Lignes isothermes.. 677
— Températures extrêmes et climats.................... 679
— Températures à diverses hauteurs au-dessus du sol.......... 681
279. Limite des neiges perpétuelles.. 682
280. De l'existence d'une couche invariable située à une certaine profondeur au-dessous du sol, et dans laquelle la température reste la même depuis des siècles.. 685
— Du mouvement de la chaleur au-dessus de la couche invariable.. 687
281. De la température à de grandes profondeurs.................. 687
— Thermomètre à maximum de M. Walferdin.............. 689
— Thermomètre à minimum de M. Walferdin.............. 690
— Thermométrographe.. 690
282. Température des sources.. 692
283. De la température des lacs et des rivières et de leur congélation .. 693
284. De la température des mers et de la formation des glaces polaires. 699

Numéros, Pages.

285. De l'équilibre de température de la terre 704
— Quantité de chaleur donnée par le soleil 707
— Pyrhéliomètre direct 707
— Pyrhéliomètre à lentille 709
— Température de l'espace 716
— Actinomètre 717

CHAPITRE II.

De l'air et des vapeurs atmosphériques.

286. Observations barométriques 725
— Hauteurs moyennes 726
— Variations diurnes 728
— Table des dépressions du mercure dans le baromètre, dues à sa capillarité 730
— Table pour réduire à 0° les hauteurs barométriques 731
287. Des vents 732
288. Des ouragans 733
— Direction des ouragans 734
289. Des trombes 735

Hygrométrie.

290. Construction et usage des hygromètres 737
— Hygromètre de condensation 738
— Tableau des poids de la vapeur qui est contenue dans un mètre cube d'air 739
— Hygromètre à capsule et à virole 739
— Hygromètre de Daniel 739
— Hygromètre d'absorption de Saussure 740
— Table hygrométrique 742
— Psychromètre d'Auguste 744
291. Du serein, de la rosée, du givre et de la gelée 744
292. Des brouillards et des nuages 747
293. De la pluie, de la neige, du verglas, du grésil et de la grêle 750

CHAPITRE III.

De la lumière météorique.

Des phénomènes lumineux 763
294. Mirage observé en Égypte 763
295. Explication du mirage 764
296. Phénomène de mirage observé en différents lieux et dans diverses circonstances 766
297. Explication du phénomène de l'arc-en-ciel 769
298. Arcs secondaires et surnuméraires 774
299. Halos et parhélies 774
300. Couronnes 776
301. Étoiles filantes 776
302. Aérolithes 777

Numéros. Pages.

CHAPITRE IV.

Électricité atmosphérique.

303. Première découverte de l'électricité atmosphérique 778
304. De l'électricité pendant les orages 780
305. Des effets du tonnerre lorsqu'il tombe sur la terre 784
306. De l'origine de l'électricité atmosphérique et de la formation des nuages orageux 794
307. Des paratonnerres. — Résumé des instructions adoptées par l'Académie des sciences en 1823 et en 1855 796

CHAPITRE V.

Du magnétisme terrestre.

308. Considérations générales 809
309. Déclinaisons 810
310. Variations diurnes 813
311. Inclinaison 815
312. Intensités 819
313. Discussion de quelques formules 824
314. Aurores boréales 828

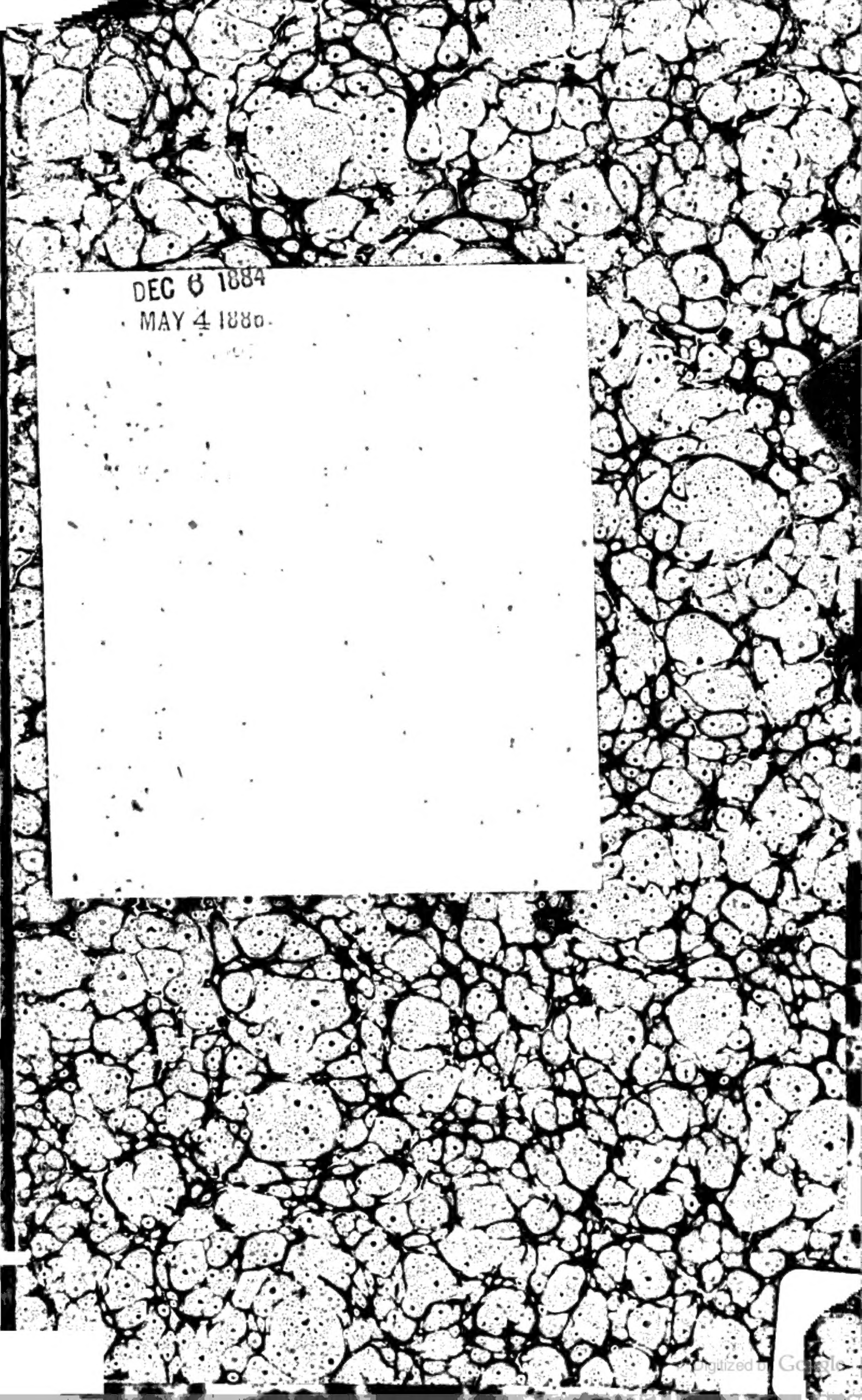
FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

Ch. Lahure, imprimeur du Sénat et de la Cour de Cassation
(ancienne maison Crapelet), rue de Vaugirard, 9.

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google


DEC 6 1884
MAY 4 1886
Digitized by Google

Widener Library
3 2044 089 506 372

Digitized by Google